



Sur la prise en compte de la qualité environnementale des produits dans la conception des chaines logistiques vertes

Imen Nourira

► To cite this version:

Imen Nourira. Sur la prise en compte de la qualité environnementale des produits dans la conception des chaines logistiques vertes. Autre. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENI088 . tel-01204779

HAL Id: tel-01204779

<https://theses.hal.science/tel-01204779>

Submitted on 24 Sep 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Et de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS

Spécialité : **Génie Industriel**

Présentée par

Imen Noura

Thèse dirigée par **Yannick Frein** et
par **Atidel B. Hadj-Alouane**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans **l'École Doctorale IMEP2**
et de l'Unité de Recherche OASIS

Sur la prise en compte de la qualité environnementale des produits dans la conception des chaines logistiques vertes

Thèse soutenue publiquement le **20 Septembre 2013**,
devant le jury composé de :

M. Mekki Ksouri

Ecole Nationale d'Ingénieurs Tunis, Président de jury

M. Anis Chelbi

Ecole Nationale Supérieure d'ingénieurs de Tunis, Examinateur

M. Bernard Grabot

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Rapporteur

M. Patrick Burlat

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Rapporteur

Mme. Atidel B. Hadj-Alouane

Ecole Nationale d'Ingénieurs Tunis, Directeur de thèse ENIT

M. Yannick Frein

Grenoble Institut Nationale Polytechnique, Directeur de thèse G INP



Remerciements

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein du laboratoire G-SCOP, INP Grenoble et de l'unité de recherche OASIS, ENI Tunis.

En premier lieu, je voudrais manifester toute ma reconnaissance à mes deux directeurs de thèse Mme Atidel B. Hadj Alouane et Mr Yannick Frein pour leur disponibilité, leurs apports et pour toute la confiance qu'ils m'ont accordée au cours des trois années de thèse. Leurs compétences et leurs conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Je leur suis également reconnaissant pour leur proximité et leurs qualités humaines qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je suis sensible à l'honneur que me font les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail:

J'exprime ma reconnaissance à M. Mekki Ksouri, Professeur à l'ENI Tunis, pour avoir accepté d'être président du jury.

J'adresse mes remerciements à Mr Bernard Grabot, Professeur à l'ENI Tarbes, pour avoir bien voulu se charger de la tâche de rapporteur.

J'adresse également mes remerciements à Mr Patrick Burlat, Professeur à l'Ecole Nationale des Mines St-Etienne, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail de thèse en acceptant d'être rapporteur.

Je remercie Mr Anis Chelbi, Professeur à l'ENSIT, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en acceptant d'être membre du jury.

Evidemment, je n'oublie pas de remercier très vivement tous ceux qui m'ont permis de passer trois années fabuleuses aussi bien à l'ENI Tunis qu'à l'INP Grenoble.

Enfin, c'est avec beaucoup d'émotion que je remercie toute ma famille et tous mes proches. Je dédie ce travail à Ramzi qui a été à mes côtés pendant ces instants de vie. Sa patience, son aide et ses encouragements m'ont permis d'aboutir et d'être à l'heure au rendez-vous !

A ma mère pour son soutien inconditionnel et ses encouragements permanents.

A mon frère pour son grand cœur et à Salma. A ma sœur et à Fethi pour leur gentillesse et leur secours. A mes petits amours Koussay et Loujayn.

Un grand MERCI à tous...

A la mémoire de mon père
A ma mère
A mon mari Ramzi
A mon frère Aymen
Ma sœur Dorra
A Mes chers Koussay et Loujayn
Au petit Youssef

Résumé

Les enjeux environnementaux impactent de plus en plus le comportement des clients ainsi que les stratégies des entreprises. Dans ce contexte, l'optimisation de la chaîne logistique en tenant compte des questions environnementales devient un enjeu critique. Dans cette thèse nous nous intéressons à cette problématique. Une originalité de ce travail est de montrer que les décisions prises lors de la conception d'une chaîne (localisation des sites, choix des processus de production, de transport,...) ont une influence sur la qualité environnementale d'un produit perçue par les clients, et influent donc sur le niveau de la demande et/ou prix de ces produits. La demande et le prix ne sont plus des variables exogènes comme pratiquement toujours considéré dans les travaux existants, mais bien des variables endogènes. Dans cette thèse nous proposons alors des modèles d'optimisation des activités logistiques en tenant compte de la qualité environnementale des produits élaborés et des préférences clients. Nous montrons grâce à des expérimentations sur un cas d'étude du secteur de textile, la pertinence de la considération de la qualité environnementale des produits dans les modèles d'optimisation des activités logistiques.

Mots-clés : chaîne logistique verte, qualité environnementale des produits, demande endogène, émission de carbone, législations environnementales.

Abstract

Environmental concerns are increasingly impacting customers' behavior as well as companies' strategies. In this context, optimizing the supply chain with environmental considerations is becoming a critical issue. In this thesis we focus on this issue. An originality of our work is to show that supply chain design decisions (facility location, choice of production processes, transportation modes, etc.) impact the environmental quality of a product and therefore affect the level of its demand and / or its selling price. Demand and price are no longer considered as exogenous variables as often done in supply chain optimization existing works, but rather as endogenous variables. In this work we propose a set of supply chain optimization models that take into account the product environmental quality and customers' preferences towards product environmental quality. Based on a case study from the textile sector, we show the relevance of considering the products' environmental quality in supply chain optimization models.

Keywords: green supply chain, product greenness, endogenous demand, carbon emission, environmental legislations.

Table des matières

Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Particularités du problème de conception de chaines logistiques dans le contexte environnemental : prise en compte de la qualité environnementale des produits et des législations environnementales	8
1.1 Caractéristiques du contexte environnemental	9
1.1.1 Un cadre législatif strict et de plus en plus contraignant.....	9
1.1.2 Un marché écologique en évolution continue	15
1.2 Relation entre les activités logistiques et la qualité environnementale des produits.	19
1.2.1 Les décisions du processus de conception de produit.	20
1.2.2 Les décisions de conception des chaines logistiques.	20
1.3 Revue de la littérature et classification des modèles existants	24
1.4 Démarche générale	32
1.4.1 Intégration des décisions de conception de chaines logistiques ayant des impacts environnementaux	32
1.4.2 Une méthode pour quantifier la performance environnementale du produit	33
1.4.3 Modélisation de la relation entre qualité environnementale, demande et prix d'un produit.....	34
1.4.4 Intégration des politiques environnementales des gouvernements	35
Chapitre II : Modélisation de la qualité environnementale des produits et modélisation du marché	37
2.1 Modélisation de la qualité environnementale des produits	38
2.2 Modélisation de la demande en fonction de la qualité environnementale des produits	43
2.2.1 Stratégie de mass marketing.....	44
2.2.2 Stratégie de segmentation du marché.....	45

Chapitre III : Présentation d'un cas d'étude dans la filière textile	52
3.1 Présentation du groupe Benetton	53
3.2 Produits textiles : cycle de vie et enjeux environnementaux	55
3.3 Stratégies environnementales de Benetton	62
3.3.1 Fibres naturelles et écologiques	63
3.3.2 Innovation des processus et recherche des Technologies alternatives	64
3.4 Détails de l'étude de cas	65
3.4.1 Produit et nomenclature	65
3.4.2 Sites de production et coûts	66
3.4.3 Fournisseurs	67
3.4.4 Technologies de production	68
3.4.5 Stratégie de transport	68
Chapitre IV : Modélisation de l'impact des décisions logistiques sur la qualité environnementale des produits : problématique de localisation des usines et de choix du mode de transport	71
4.1 Présentation de la problématique	72
4.2 Formulation du modèle	74
4.2.1 Modèle à un seul fournisseur, un seul site de production avec capacité infinie.	76
4.2.2 Modèle à plusieurs fournisseurs, plusieurs sites et des capacités finies (<i>MLT2</i>)	79
4.3 Expérimentations des modèles	80
4.3.1 Description de l'étude de cas	80
4.3.2 Résultats du modèle <i>MLT1</i> : un fournisseur, un site de production avec capacité infinie	82
4.3.3 Résultats du modèle <i>MLT2</i> : plusieurs fournisseurs et plusieurs sites de production avec capacités finies	89
Chapitre V : Modélisation de l'impact des décisions logistiques sur la qualité environnementale des produits : problématique de choix des technologies de production et des fournisseurs avec prise en compte des législations environnementales	98

5.1 Présentation de la problématique.....	99
5.2 Formulation du problème <i>MPC1</i> : stratégie de mass marketing	102
5.2.1 Notations	102
5.2.2 Fonction objectif	104
5.2.3 Les contraintes du modèle.....	104
5.3 Expérimentations du modèle <i>MPC1</i>	107
5.3.1 Présentation des données :.....	107
5.3.2 Démarche expérimentale et Résultats	109
5.4 Stratégie de segmentation du marché : présentation du modèle <i>MPC2</i>	113
5.4.1 Notations :.....	114
5.4.2 Fonction objectif	115
5.4.3 Formulation des contraintes de la demande et du prix.....	116
5.5 Comparaison entre stratégie de mass marketing et stratégie de segmentation du marché	117
5.6 Impact des législations sur la qualité environnementale des produits et la performance environnementale de l'entreprise.....	119
5.6.1 Impact des législations de type valeurs seuils d'émission	119
5.6.2 Impact des coûts d'achat des permissions d'émissions négociables (<i>PEN</i>):	121
5.6.3 Impact des coûts de processus de production :	124
Conclusion Générale	128
References	135

Liste des figures

Figure 1.1. Déterminants de la qualité environnementale des produits	20
Figure 1.2. Part des émissions de CO ₂ liées au transport (CEMT, 2007).....	23
Figure 2.1. Courbe typique de l'élasticité prix demande (Guyot, 2001 Eléments de microéconomie. Edition technip, 37)	47
Figure 2.2. Courbe atypique de l'élasticité prix demande (F. Guyot. Eléments de microéconomie. Edition technip, 57)	48
Figure 2.3. Modélisation de la demande et du prix pour la stratégie de segmentation du marché.	50
Figure 3.1. Principales étapes du secteur textile	55
Figure 3.2. Panorama des fibres textiles (Environmental Health and Safety guidelines for textile manufacturing, avril 2007)	57
Figure 3.3. AirDye comparé au procédé ordinaire (25000 t-shirts de taille moyenne).....	65
Figure 3.4. Estimation de l'empreinte carbone associée au transport d'une tonne de marchandise depuis Sousse (Tunisie) vers Paris (France) selon différents modes de transport.	69
Figure 3.5. Estimation de l'empreinte carbone associée au transport d'une tonne de marchandise depuis Shanghai (Chine) vers Paris (France) selon différents modes de transport.	70
Figure 4.1. Structure de la chaîne logistique considérée.....	80
Figure 4.2. Variation du niveau de la qualité environnementale du produit fini en fonction de la sensibilité du marché (α)	86
Figure 4.3. Impact de la sensibilité du marché (α) sur le % gain (g) et sur les coûts globaux de l'entreprise.....	86
Figure 4.4. Impact de la sensibilité du marché sur le coût unitaire par produit fini.....	87
Figure 4.5. Impact de la sensibilité du marché (α) sur les émissions totales de carbone et les émissions par unité de produit fini.	88
Figure 4.6. Impact de la variation de la sensibilité du marché (α) sur la qualité environnementale des produits.....	95
Figure 4.7. Impact de la variation de la sensibilité du marché (α) sur le gain (g).....	95
Figure 5.1. Evolution du Gain (g) en fonction de la variation du prix de vente et pour différentes valeurs de la sensibilité du marché.....	112

Figure 5.2. Evolution des quantités des émissions totales dégagées en fonction des coûts d'achats des PEN.....	122
Figure 5.3. Variation de la qualité environnementale en fonction du coût d'achat des PEN.	124
Figure 5.4. Variation de la qualité environnementale des produits en fonction de l'augmentation des coûts des processus de production.....	125
Figure 5.5. Variation de la qualité environnementale des produits en fonction de l'augmentation des coûts des processus de production.....	126

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Classification des modèles existants selon les aspects environnementaux identifiés	30
Tableau 3.1. Composants du produit fini	66
Tableau 3.2. Moyenne des coûts horaires de la main d'œuvre du secteur textile.....	67
Tableau 4.1. Quantité de carbone dégagée et coûts d'achat du composant P1 par le site de production Chinois.	81
Tableau 4.2. Quantité de carbone dégagée et coûts de transport du produit fini à partir des sites de production potentiels vers la zone des clients.	82
Tableau 4.3. Paramètres et coûts du modèle	82
Tableau 4.4. Résultats pour différentes valeurs de la sensibilité du marché (α).....	84
Tableau 4.5. Résultats du MLT0 en considérant plusieurs sites de production avec des capacités finies	89
Tableau 4.6. Résultats du MLT2	92
Tableau 5.1. Emissions dégagées par chacun des processus potentiels de production.....	108
Tableau 5.2. Paramètres et coûts du modèle	109
Tableau 5.3. Résultats comparatifs pour (MPC2)	118
Tableau 5.4. Niveaux seuils pour différents types d'émission considérée.....	119
Tableau 5.5. Impact de la variation de la valeur seuil d'émission	120

Introduction Générale

Les problématiques environnementales sont, de nos jours, au cœur des préoccupations de tous les acteurs économiques, industriels, sociaux, politiques, etc. La prise de conscience grandissante des menaces que peuvent présenter les activités industrielles, a poussé les gouvernements à mettre en place un cadre législatif afin de réglementer les pratiques industrielles et limiter leurs impacts négatifs sur l'environnement. Les consommateurs sont de plus en plus sensibles à la qualité environnementale des produits qu'ils achètent (Krass et al., 2013, Lin et al., 2013 ; Blengini et Shields, 2010 ; Young et al., 2010 ; Brécard et al. 2009). Un produit dont l'impact négatif sur l'environnement est limité peut être plus demandé ou peut être vendu à un prix plus élevé (Krass et al., 2013, Kurtyka et Mahenc, 2011 ; Mahenc, 2008 ; Brécard et al, 2009 ; DHL, 2010 ; Eurobaromètre, 2009 ; Houe et Grabot, 2009).

Dans ce contexte où les défis environnementaux viennent s'ajouter aux défis économiques, les entreprises se trouvent obligées d'intégrer les problématiques environnementales dans leur gestion. En particulier, la prise de conscience des clients envers l'environnement et le poids croissant des contraintes et des taxes environnementales poussent les entreprises à repenser leurs activités de production et la configuration de leurs chaînes logistiques.

Problématique fondamentale

Désormais, les entreprises doivent répondre à une question fondamentale : serait-il plus intéressant de continuer à acheter, produire, et distribuer avec les méthodes conventionnelles qui ne tiennent pas compte de l'impact sur l'environnement ; ou faut-il intégrer les pratiques environnementales dans les systèmes de production et les chaînes logistiques afin de réduire l'impact négatif des produits fabriqués sur l'environnement, et améliorer ainsi leur qualité environnementale ?

Dans le premier cas, l'entreprise n'a pas à supporter un coût supplémentaire lié à la reconfiguration de son système de production et sa chaîne logistique mais pourrait voir sa demande baisser (clients de moins en moins enthousiastes à acheter des produits de faible qualité environnementale). En plus, elle pourrait avoir à payer des pénalités liées au non-respect des législations environnementales (exemple des pénalités liées à des taux élevés d'émissions de polluants). Evidemment, tout cela peut engendrer une diminution du profit de l'entreprise.

Dans le deuxième cas, l'entreprise peut améliorer son chiffre d'affaire (augmenter la demande et/ou augmenter le prix de vente) et éviter les problèmes liés aux législations mais devra supporter un coût significatif pour sélectionner de nouvelles matières premières de bonne qualité environnementale, remplacer les technologies de production polluantes par des

technologies plus respectueuses de l'environnement, changer la localisation des sites de production et de distribution pour réduire le transport, etc.

Le but de toute entreprise est généralement de trouver la solution qui permet de maximiser son profit. Il est intéressant de pouvoir caractériser, comprendre et analyser cette solution dans ce contexte où les problématiques environnementales sont prises en compte. Nous nous proposons dans cette thèse de répondre à ces questions dans des situations différentes de demande (structure du marché) et de structure de la chaîne logistique. Une originalité de notre travail est de montrer que les décisions prises lors de la conception d'une chaîne logistique (localisation des sites, choix des modes de production, de transport,...) ont une influence sur la qualité environnementale d'un produit perçue par les clients, et influent donc sur la demande de ces produits. Cette demande n'est en fait pas exogène comme presque toujours supposé dans les modèles existants mais bien endogène.

Dans certains scénarios, le prix de vente est aussi endogène et dépend de la qualité environnementale du produit. La demande en produits verts est en effet le résultat d'une tension entre le souhait des consommateurs de consommer des produits verts et le prix de ces produits souvent encore plus élevés.

Objectifs généraux

Ainsi, les principaux objectifs de cette thèse sont les suivants :

- **Modéliser la corrélation entre la configuration de la chaîne logistique, la qualité environnementale du produit fini qui en résulte, et la demande de ce produit.** Il s'agit d'une part, d'identifier la relation entre la configuration d'une chaîne logistique donnée et la qualité environnementale des produits finis élaborés. Nous cherchons à mesurer (quantifier) la qualité environnementale des produits à partir d'une configuration donnée de sa chaîne logistique. D'autre part, il s'agit d'identifier la relation entre la qualité environnementale d'un produit fini, sa demande et son prix de vente afin de trouver les valeurs de la demande et du prix pour une qualité environnementale donnée.
- **Développer des modèles d'optimisation pour la conception des systèmes de production et des chaînes logistiques en intégrant les problématiques environnementales.** Il s'agit de proposer des modèles d'optimisation où la demande dépend de la qualité environnementale des produits finis et où cette qualité environnementale est déterminée en fonction des décisions logistiques (sélection des composants et fournisseurs, choix de technologies, choix de localisation, sélection des modes de transport, etc.). Les réglementations environnementales imposées par les

gouvernements sont aussi prises en compte. Le but est de chercher la solution qui maximise le profit de l'entreprise.

- **Exploiter les modèles proposés pour tirer des recommandations managériales qui peuvent être bénéfiques pour les dirigeants des entreprises, d'une part, et les gouvernements, d'autre part.** Il s'agit par exemple d'analyser la relation entre performance économique et performance environnementale dans une chaîne logistique et de déterminer une politique environnementale qui permet de garantir à la fois le respect de l'environnement et la compétitivité des entreprises.

Positionnement par rapport à la littérature

La littérature dédiée aux problématiques environnementales est de plus en plus dense et variée (Jaegler et Burlat, 2013 ; Chaabane et al., 2012 ; Wee et al., 2012 ; Cachon, 2011 ; Chardine-Baumann 2011 ; Jacobs et al., 2010 ; Chaabane et al., 2011). Elle couvre plusieurs disciplines telles que le marketing, l'économie, la conception de produit (Borchardt, 2011; Dangelico et Pontrandolfo, 2010 ; etc.), et la gestion des systèmes de production. En ce qui concerne les systèmes de production, les principaux travaux s'intéressent aux problématiques environnementales dans la gestion du transport (Lee, 2011; Hua et al., 2011; Sawadogo et Anciaux 2011 ; Hoen et al., 2011 ; Pan et al., 2010 ; Ülengin et al., 2010 ; etc.), la gestion des stocks (Bouchery et al. 2012 ; Benjaafar et al. 2010 ; etc.), la logistique inverse (Abdessalem et al., 2012 ; Shi et al., 2011; Teunter et Flapper, 2011; Li et al., 2009 ; etc.), et la gestion de la production (Chen et Monahan, 2010 ; Radulescu et al., 2009 ; Quariguasi Frota Neto et al., 2008).

L'émergence des problématiques environnementales a permis de classer les travaux sur la gestion des chaînes logistiques en gestion des chaînes logistiques conventionnelles (quand les problématiques environnementales ne sont pas intégrées) et gestion des chaînes logistiques dites « vertes » (celles qui intègrent les problématiques environnementales). Srivastava (2007) définit la gestion de la chaîne logistique verte comme « l'intégration de la conscience environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, en incluant la phase de conception du produit, l'extraction et le choix des matériaux et matières premières, le processus et les procédés de fabrication, la livraison du produit fini au client ainsi que la gestion de la fin de vie du produit ».

Notre travail s'inscrit dans le cadre des travaux se rapportant à la conception et la gestion des chaînes logistiques vertes. Il est important de noter que la plupart des modèles proposés pour

la conception des chaines logistiques ignorent la corrélation entre la qualité environnementale du produit, sa demande, et sa chaine logistique.

En effet, que ce soit dans les chaines logistiques conventionnelles ou vertes, la demande est souvent considérée comme un paramètre d'entrée connu à l'avance indépendamment des décisions du modèle. On parle alors de demande exogène. En plus, la qualité environnementale des produits n'est presque jamais quantifiée et mesurée en fonction des décisions logistiques.

Comme la littérature sur la logistique est assez pauvre par rapport à la relation entre la demande et la qualité environnementale du produit, nous nous sommes orientées vers la littérature liée à l'économie et le marketing pour mieux comprendre ce phénomène.

Intérêt du travail

Dans la littérature, nous retrouvons plusieurs travaux qui s'intéressent à l'optimisation des chaines logistiques sous des contraintes environnementales. Notre travail est, à notre connaissance, le premier qui s'intéresse à la conception des chaines logistiques en tenant compte de la corrélation entre les décisions logistiques, la qualité environnementale des produits et la demande. Dans ce travail, nous tenons compte également des législations environnementales portant sur les émissions polluantes. Ce travail contribue donc à la littérature et complète les approches existantes sur la gestion des chaines logistiques vertes.

Nous adressons ainsi un nouvel axe de recherche qui nécessite évidemment de nouveaux indicateurs de mesure de la qualité environnementale des produits et de nouvelles formes de modélisation de la demande et du prix des produits. En particulier, ce travail nécessite de développer des méthodes pour mesurer (quantifier) la qualité environnementale des produits en fonction des activités de la chaine logistique et pour modéliser l'impact de la qualité environnementale des produits sur la demande et le prix de vente.

Notre travail a également un intérêt pratique puisque les modèles proposés sont exploités pour fournir une aide à la décision et des recommandations managériales pour les entreprises et les gouvernements.

Plan de lecture

Dès lors, ce manuscrit est organisé comme suit :

- Après l'introduction générale, nous dédions le premier chapitre à une étude générale autour du problème de conception des chaines logistiques dans un contexte

environnemental. Nous identifions tout d'abord les défis auxquels sont confrontées les entreprises suite à l'émergence de la question environnementale. Nous nous basons sur une observation du cadre législatif, puis une étude de l'évolution du marché et du comportement des clients dans différents secteurs industriels. Ainsi, nous identifions l'impact de ces défis environnementaux sur les modèles de conception des chaînes logistiques et par la suite les composants clés qui doivent être considérés dans un modèle de conception de chaîne logistique pour qu'il soit adapté au contexte environnemental. Des travaux pertinents sont ensuite sélectionnés parmi la littérature existante et classifiés selon leur prise en compte de ces différents éléments. Enfin, nous proposons un modèle descriptif qui fournit une approche générale de modélisation de chaîne logistique dans le contexte environnemental. Des directives et des recommandations de modélisation sont aussi présentées.

- Les connaissances acquises tout au long du premier chapitre sont exploitées afin de proposer, dans le deuxième chapitre, une méthode de modélisation de la qualité environnementale du produit en fonction des décisions logistiques ainsi qu'une méthode pour la modélisation de la demande et du prix en fonction de la qualité environnementale des produits. Nous montrons que selon la stratégie des entreprises et la structure du marché, deux stratégies sont possibles, à savoir le « mass marketing » et la « segmentation du marché ».
- Afin de compléter notre étude théorique par une approche pratique, nous dédions le troisième chapitre à la présentation d'un cas réel d'une multinationale qui est confrontée aux différents défis environnementaux décrits précédemment. En effet, nous nous intéressons à la compagnie Benetton du secteur de textile, un des secteurs industriels les plus polluants. Nos contacts ont été noués avec la filiale basée en Tunisie. Ce cas sert, d'une part, à illustrer l'approche de la problématique étudiée. D'autre part, il permet de générer les différentes instances qui sont utilisées pour tester les modèles mathématiques développés dans le cadre de cette thèse.
- En se basant sur les résultats des chapitres précédents, nous développons dans le quatrième chapitre un modèle mathématique de conception de chaîne logistique qui permet d'adresser la corrélation entre les décisions logistiques (à savoir la sélection des fournisseurs, la localisation des sites et la sélection des modes de transport) et la qualité environnementale des produits fabriqués. Nous intégrons aussi la corrélation entre la qualité environnementale et la demande des produits. Nous considérons dans ce chapitre un seul attribut de la qualité environnementale, lié aux taux des émissions de carbone des

activités de transport, et nous traitons le cas de mass marketing. Nous présentons à la fin de ce chapitre, les résultats de nos expérimentations.

- Nous développons dans le cinquième chapitre un modèle qui s'intéresse aux décisions de choix de technologies de production et de sélection des composants. Dans ce chapitre la qualité environnementale des produits est présentée par deux attributs qui sont respectivement liés aux taux des émissions dégagées par le processus de production sélectionné et le taux des composants verts utilisés. Nous intégrons dans ce modèle, les législations environnementales liées aux émissions polluantes. En plus de la stratégie de mass marketing, étudiée dans le chapitre précédent, nous considérons ici le cas de segmentation du marché. Nous cherchons tout d'abord à comparer la stratégie de segmentation du marché à celle de mass marketing en termes de performances économiques et de décisions logistiques. Le deuxième objectif de ce chapitre est d'étudier l'impact des législations environnementales sur la qualité environnementale des produits fabriqués ainsi que sur les performances économiques et environnementales de l'entreprise.
- La conclusion générale reprend les grandes lignes de ce travail de thèse et permet d'ouvrir sur de nouvelles pistes de recherche.

**Chapitre I : Particularités du problème de conception de chaines logistiques dans le
contexte environnemental : prise en compte de la qualité environnementale des produits
et des législations environnementales**

Introduction :

L'objectif du présent chapitre est d'identifier les composants clés qui doivent être considérés dans un modèle mathématique de conception de chaîne logistique adapté au contexte environnemental. Pour ce faire, nous identifions tout d'abord les défis auxquels sont confrontées les entreprises suite à l'émergence de la question environnementale. Nous nous basons en premier lieu sur une observation du cadre législatif, puis sur une étude de l'évolution du marché et du comportement des clients dans différents secteurs industriels (textile, alimentaire, électronique, etc.). Ainsi, nous identifions, dans un premier temps, l'impact de ces défis environnementaux sur les modèles de conception des chaînes logistiques et par la suite les composants clés qui doivent être considérés. Ensuite, nous étudions comment les travaux existants répondent aux différents points identifiés. Des recommandations et des lignes directrices de modélisation sont données à la fin de ce chapitre.

1.1 Caractéristiques du contexte environnemental

1.1.1 Un cadre législatif strict et de plus en plus contraignant

Les législations environnementales font référence aux lois et aux réglementations imposées par les gouvernements afin d'inciter les entreprises à minimiser l'impact de leurs activités sur l'environnement. Selon [Brécard et al. \(2009\)](#), l'histoire des législations environnementales a commencé en Europe vers 1990. Mais beaucoup d'historiens remontent les premiers signes législatifs pour la protection de l'environnement à la période du moyen âge. A cette époque, les fumées de la combustion du charbon préoccupaient les autorités et le législateur avait émis à plusieurs endroits notamment à Paris et à Londres, des directives préventives à leur endroit. Certaines autorités municipales réglementèrent ensuite les domaines de la santé et de la salubrité (hygiène) publique. Puis d'autres législations environnementales ont apparu progressivement. Aujourd'hui, les lois et les législations environnementales ne cessent de se développer et de se diversifier selon les pays et selon les secteurs d'activités industrielles. Les lois environnementales soumettent les entreprises à des contraintes et des réglementations strictes allant des incitations financières aux pénalités et taxes environnementales.

En Europe les textes sont multiples. Nous citons par exemple la directive *Reach* qui exige une évaluation ou réévaluation de la dangerosité de nombreux produits avant ou après leur mise sur le marché. L'*EPER* (European Pollutant Emission Registry) est le premier registre

européen relatif aux émissions industrielles dans l'atmosphère et dans l'eau. Ce registre, établi en 2000, concerne cinquante polluants émis dans l'eau et dans l'air par les principales installations industrielles. Ce registre a été révisé en 2009 et remplacé par un registre européen des rejets et des transferts de polluants (*The European Pollutant Release and Transfer Register E-PRTR*). Nous pouvons citer également le sommet de Göteborg (2001) dont les grandes lignes s'articulent autour du développement de transports propres, de l'utilisation d'énergies propres et surtout la mise en place d'actions ayant pour objectif d'associer la croissance économique, la cohésion sociale et la protection de l'environnement. Le plus célèbre entre les différentes directives et lois environnementales en Europe reste le protocole de Kyoto. Il s'agit d'un traité international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Signé le 11 décembre 1997 lors de la 3^e conférence annuelle de la Convention (COP 3) à Kyoto, au Japon, il est entré en vigueur le 16 février 2005 et a été ratifié par 168 pays en 2010. Ce protocole vise à réduire les émissions de six gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones.

Pour réduire ces émissions, les gouvernements européens ont mis en place deux outils. Ce sont les taxes et les permis d'émission négociables (*PEN*), qui ont chacun leur légitimité, leurs effets pervers et leurs champs d'application privilégiés.

Le principe des taxes, qu'elles portent sur l'énergie ou directement sur les émissions, est simple : il s'agit d'inciter les industriels à réduire leurs émissions en pénalisant ces dernières. Les valeurs des taxes sont déterminées selon le type des émissions et leur nuisance à l'environnement.

Le principe des permis d'émissions est le suivant : il s'agit de titres échangeables sur le marché, comme des actions, qui confèrent à leur détenteur un « droit à polluer ». Le volume de titres étant contrôlé par les autorités, le système permet de fixer précisément la quantité d'émissions. En effet, pour encourager les entreprises à agir sur leurs émissions, les gouvernements offrent aux entreprises la possibilité de vendre ces quotas de permission de pollution quand elles polluent moins que le seuil permis. Cela prend donc la forme d'une incitation financière. Dans le cas contraire, lorsque l'entreprise dépasse le seuil, elle peut acheter des quotas de permission de polluer. Cela prend donc la forme d'une pénalité.

Actuellement, l'application de ces deux outils économiques varie fortement d'un État membre à l'autre. C'est ainsi que des amendes allant de 750 000 euros à 1,5 million d'euros peuvent être infligées, ainsi que pour les personnes, des peines de prison allant de 5 à 10 ans. L'Union européenne a imaginé un mécanisme hybride pour l'application du protocole de Kyoto : chaque pays membre s'est vu assigné un objectif de réduction de ses émissions, de telle sorte que la réduction globale corresponde à l'engagement pris mais avec un coût global le plus faible possible. Ainsi, la France, dont les émissions par habitant sont déjà très basses, doit se stabiliser à 0 % tandis que l'Allemagne, dont les coûts marginaux de réduction sont peu élevés à cause de la restructuration à l'est, doit réduire ses émissions de 35 % par rapport à 1990. À chaque pays d'adopter par la suite les mesures qu'il préfère : permis, écotaxe ou une combinaison des deux. Dans ce qui suit, nous présentons le cadre législatif environnemental dans certains pays de l'union européenne.

Réglementations en France.

La France a retenu le principe pollueur-payeur, qui fait assumer au pollueur la charge financière de la prévention, de la réduction et de la lutte contre la pollution. Dans cette optique, les équipements et les produits polluants devraient être plus taxés que les produits dits écologiques. Des incitations financières, comme des réductions d'impôts, visant à promouvoir le développement des énergies renouvelables peuvent être appliquées. Lors d'une catastrophe écologique, le pollueur est censé assumer le nettoyage des zones contaminées. Dans ce qui suit, nous donnons des exemples d'application du principe pollueur-payeur.

- Une « écotaxe » porte sur les équipements électriques et/ou électroniques depuis 2006 pour financer la collecte, recyclage ou valorisation des Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). La taxe (ex : 7 à 15 euros pour un réfrigérateur) est touchée par les municipalités qui doivent soutenir le tri sélectif des DEEE (environ 15 Kg de produits chaque année en France, par habitant).
- Dans le cadre de l'achat d'une voiture, à partir de 141g d'émission de CO₂ par kilomètre parcouru, le consommateur devra payer une surtaxe suivant le barème ci-après (141-150g/km = 200 €, 151-155g/km = 500 €, 156-180g/km = 750 €, 181-190g/km = 1300 €, 191-230g/km = 2300 €, 230g/km et plus = 6000 €).

Réglementations en Suède

En Suède, l'écotaxe a été mise en œuvre pour réduire les émissions de dioxyde de soufre (SO₂), responsables des pluies acides. Cette écotaxe était réellement incitative puisqu'elle s'élevait à 4 500 euros par tonne de dioxyde de soufre émise. Elle a permis de ramener les émissions à un niveau raisonnable, bien que légèrement en dessous des espérances.

L'expérience suédoise n'est peut-être pas directement transposable à la réduction des émissions de dioxyde de carbone, dans la mesure où il n'existe pas de solutions techniques aussi simples et rapides dans ce cas que dans celui du dioxyde de soufre. Alors que le dioxyde de soufre est généralement le produit de réactions secondaires ou indésirables, le dioxyde de carbone est le produit attendu de toute combustion. Dans le premier cas on peut jouer sur les réactifs (par exemple substituer un charbon à basse teneur en soufre au charbon habituel) alors que dans le second cas il est impossible de réduire directement les émissions, à moins de disposer d'une production d'énergie renouvelable importante. Cette situation est rarement rencontrée.

Réglementations en Allemagne

En Allemagne, le principe d'écotaxe n'a pas été explicitement introduit dans la législation. C'est pourtant bien dans l'esprit de l'écotaxe qu'a été introduite la taxe sur l'électricité, à partir du 1^{er} avril 1999, simultanément avec l'augmentation de la taxe sur les hydrocarbures. Ces mesures ont permis la diminution concomitante des rejets de dioxyde de carbone et de la dépendance énergétique allemande par l'amélioration de l'efficacité énergétique des entreprises et le financement de politiques de développement des énergies renouvelables. Depuis 1999, ces taxes ont connu plusieurs augmentations et des aménagements dans les entreprises à haute intensité énergétique telles que les entreprises du transport aérien.

Le cas des pays en voie de développement

Pour la majorité des pays en voie de développement et en particulier pour des pays comme la Chine ou l'Inde, comparés aux autres enjeux du développement, les problèmes environnementaux ne sont pas prioritaires. En effet, ces pays n'ont pas les mêmes sensibilités vis-à-vis des questions environnementales, et en particulier n'ont pas d'engagement quantifié de réduction de leurs émissions dans le protocole de Kyoto.

Les normes environnementales

En plus des instruments économiques (taxes, pénalités environnementales), plusieurs normes environnementales ont été mises en place. Il existe deux types d'approches pour les normes : l'approche produit qui consiste à la création de label par exemple, et l'approche processus comme pour les normes ISO 14000. La série des normes ISO 14000 désigne l'ensemble des normes qui concernent le management environnemental. Ces normes s'adressent donc à toutes les organisations et sociétés qui veulent mettre en œuvre une gestion visant à maîtriser leurs impacts sur l'environnement.

L'ensemble de ces normes forme un outil visant à harmoniser l'approche des organisations en ce qui concerne la gestion environnementale. Leur application est en général volontaire. Cependant, il arrive fréquemment qu'un donneur d'ordre privé ou public impose la mise en place d'un système de gestion environnementale à ses fournisseurs ou sous-traitants. Cette exigence est d'ailleurs souvent le résultat de sa propre politique environnementale.

La plus célèbre et la plus utilisée des normes de cette série est la norme ISO 14001. Une organisation peut faire certifier son système de management environnemental suivant cette norme par des organismes tierce partie accrédités comme l'Association française pour l'assurance de la qualité, l'AFNOR, etc. Cette certification est réalisée par un système d'audit.

Les autres normes sont des normes supports non-obligatoires dans le cadre d'une certification, mais destinées à aider et à donner des outils communs.

Liste des normes de la série ISO 14000 :

- ISO 14001 Management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation. Deuxième édition parue le 15 novembre 2004.
- ISO 14004 : Lignes directrices du système environnemental
- ISO 14006 : Eco-conception, réduction des impacts environnementaux des produits et des services.
- ISO 14010, 14011, 14012 : Audit du système environnemental.
- ISO 14031 : Indicateurs environnementaux.
- ISO 14040 : Analyse du cycle de vie, principes et cadre.
- ISO 14044 : Analyse du cycle de vie, exigences et lignes directrices.

Si la norme est un outil pour les entreprises permettant de mettre en place un système maîtrisé de suivi des questions environnementales, elle génère en revanche des critiques sur certains points. Elle ne mentionne en aucun point une obligation de développement durable. Si une entreprise est certifiée ISO 14001, cela ne signifie ni qu'elle ne pollue pas ni qu'elle respecte les réglementations environnementales, mais seulement qu'elle a fait le nécessaire pour tenter d'atteindre les objectifs qu'elle s'est elle-même fixée dans son plan d'action. La norme démontre également l'engagement d'un progrès continu (Druez-Vérité et Niek, 2008).

En résumé, les gouvernements usent de toutes sortes de lois et de législations afin d'inciter les entreprises à réduire l'impact de leurs activités sur l'environnement : des normes et des systèmes de certification de bonnes conduites environnementales, des pénalités sous forme d'écotaxes ou des permissions d'émissions négociables, des incitations et des aides financières pour l'utilisation des énergies renouvelables et l'implémentation des activités environnementales. Avec la croissance des problèmes environnementaux, ces lois s'avèrent de plus en plus strictes et de plus en plus pesantes et contraignantes pour les entreprises. Ces dernières doivent y faire face et mettre en place les dispositifs les plus adaptés afin de minimiser les coûts de conformité à ces lois. Lorsque les législations environnementales commençaient à faire leurs apparitions, les entreprises ont commencé à répondre à ces législations de manière réactive. Leurs actions consistaient principalement à mettre en place des systèmes pour le traitement des émissions et des déchets après leurs occurrences. Toutefois, avec l'évolution et l'importance grandissante que prend de plus en plus le cadre législatif, ces actions s'avèrent coûteuses et même inefficaces. Si les entreprises veulent éviter les coûts élevés de conformité aux législations environnementales et réduire les pénalités payées, elles doivent désormais faire plus d'effort et affronter ces législations d'une manière plus proactive. Il ne suffit plus d'avoir des actions en fin de pipeline qui consistent en des traitements des déchets et des émissions mais plutôt des actions proactives et innovantes.

Nous pensons que les entreprises doivent considérer les lois environnementales dans leur démarche de conception des chaînes logistiques. Ceci leur permettra de revoir leurs processus de production, leurs systèmes de transport et logistiques à la lumière des nouvelles contraintes législatives environnementales. Ainsi les entreprises peuvent réduire les impacts environnementaux de leurs activités avant leurs occurrences en favorisant les nouvelles technologies moins polluantes et les énergies renouvelables et propres. Dans ce cas les entreprises pourraient non seulement se conformer aux législations environnementales mais

également profiter des incitations financières offertes par les gouvernements pour la restructuration des activités logistiques et la reconfiguration de la chaîne logistique en faveur de l'environnement. Ainsi, nous considérons que la prise en compte des législations environnementales depuis les étapes de conception de la chaîne logistique permet aux entreprises de répondre à ces contraintes d'une manière proactive et de réduire ainsi les coûts de conformité aux législations environnementales.

1.1.2 Un marché écologique en évolution continue

Avec l'émergence des questions environnementales, un nombre croissant de consommateurs s'intéressent à la performance environnementale des produits. Selon les études de la Commission européenne (2009), 83% des Européens accordent une grande attention à l'impact des produits sur l'environnement en faisant leurs achats. La qualité environnementale d'un produit est devenue l'un des facteurs les plus importants qui influent sur les décisions d'achat de nombreux consommateurs.

Selon une étude menée par le *Centre for Retail Research*, les Français par exemple, achètent de plus en plus les produits écologiques bien que ces derniers leur coûtent plus qu'un produit standard. Malgré des prix plus élevés, les ventes des produits écologiques en France devraient passer de 10,6 milliards d'euros en 2009 à 21,7 milliards en 2015 et leur part dans les ventes totales de produits de détail devrait progresser de 2,4% à 4,4%, dépassant aisément le taux de croissance des produits de détail conventionnels (ordinaires).

Selon une étude de la Commission européenne (2009), une forte croissance pour ce type de produit est attendue pour 2015. Les foyers français prévoient d'augmenter leurs dépenses moyennes annuelles en produits écologiques de 413 euros en 2009 à 841 euros en 2015. Une croissance est attendue au niveau de toutes les catégories de produits écologiques avec en tête les équipements électriques pour 9,3 milliards d'euros, l'alimentaire pour 5,1 milliards d'euros et les fournitures de bureau pour 1,8 milliard d'euros. Les voitures hybrides sont de plus en plus familières aux Français. Leurs ventes ont augmenté de 3 200 unités en 2005 à 12 000 unités en 2009 et devraient atteindre les 45 000 unités en 2015. Le marché français des voitures hybrides représentera environ 960 millions d'euros en 2015 (*Centre for Retail Research*).

En raison de la hausse du prix de l'énergie, de l'intérêt croissant des consommateurs pour les produits à économie d'énergie et des réglementations adoptées, les ventes de produits

électroniques grand public et d'éclairage éco-conçus devraient dépasser le secteur de l'alimentation et des boissons pour prendre la première place en termes de dépenses écologiques. Les ventes de produits électroniques grand public et d'éclairage éco-conçus devraient passer de 3,1 milliards d'euros en 2009 à 9,3 milliards d'euros en 2015 (Centre for Retail Research), ce qui représente une croissance de 200%.

Le secteur de l'alimentation et des boissons bio en France devrait connaître la plus faible progression, toutes catégories confondues, avec une croissance de seulement 50% (de 3.4 milliards d'euros à 5.1 milliards) ([Retail Ethics and Green Retailing, 2012](#)).

D'après ces études statistiques pour différents marchés et pour différents secteurs industriels, il est clair que le comportement des clients finaux envers la qualité environnementale des produits achetés change et évolue d'une façon considérable. Par conséquent, la structure du marché change fondamentalement. Nous assistons à une demande croissante pour les produits écologiques dans les différents secteurs. Les secteurs alimentaires et textiles sont les premiers à avoir connu cette tendance grandissante pour l'achat des produits écologiques. Dans ces secteurs l'aptitude des clients aux achats écologiques est renforcée principalement par des raisons liées à la santé et au bien-être des consommateurs. Au début de l'émergence de la question environnementale, certains industriels dans ces deux secteurs avaient tendance à vendre des produits biologiques sous l'étiquette de produits écologiques. Aujourd'hui les consommateurs sont plus conscients et mieux renseignés sur la question environnementale et les produits écologiques. Un produit biologique qui est issu de matières premières ou de composants d'origine naturelle n'est pas forcément un produit écologique sans impact néfaste sur l'environnement. Les industriels des secteurs alimentaire et textile doivent alors réviser leurs systèmes de production et leurs activités logistiques afin de satisfaire les attentes de leurs clients. D'ailleurs, une étude détaillée est consacrée au cas du secteur textile dans le chapitre 3. Outre les secteurs textile et alimentaire, aujourd'hui un intérêt croissant envers les produits écologiques existe dans les différents secteurs industriels. Nous assistons aujourd'hui à une vraie restructuration du marché. Plusieurs travaux dans la littérature décrivent une demande croissante des produits en fonction de leurs qualités environnementales ([Krass et al., 2013](#); [Su et al., 2012](#); [Brécard, 2009, etc.](#)) suite au gain de nouvelles parts du marché vert. Certains économistes et chercheurs parlent même d'une segmentation de marché. Par exemple, [Chen \(2001\)](#) divise le marché en deux segments : des clients ordinaires et des clients verts. Les clients ordinaires s'intéressent principalement aux caractéristiques classiques des

produits (prix, qualité, etc.) et ignorent leurs performances environnementales. Toutefois, les clients verts n'achètent que des produits ayant un certain niveau de qualité environnementale. Cela montre que la demande d'un produit est devenue corrélée à son niveau de qualité environnementale. Une telle corrélation devrait être prise en compte dans la conception de la chaîne logistique si les questions environnementales représentent une préoccupation majeure. Une question clé est donc de savoir comment la demande d'un produit varie en fonction du niveau de sa qualité environnementale.

En plus de l'impact de la performance environnementale sur la demande, il est important de comprendre comment le prix d'un produit peut varier en fonction de sa qualité environnementale.

La comparaison des prix est compliquée car les spécificités et les modes de production des produits écologiques et des produits ordinaires sont souvent très différents. Par exemple, la nourriture écologique peut être plus chère mais présente généralement les avantages d'une production locale et de saveurs plus intenses. De même, les nouvelles ampoules à économie d'énergie sont plus chères, vendues en moyenne au prix unitaire de 1,14 euro contre 0,45 euro pour les ampoules à incandescence. Mais elles sont moins gourmandes en énergie et bénéficient d'une durée de vie de neuf ans.

En général, les prix des produits croissent avec l'augmentation du niveau de leurs performances environnementales. A notre avis, il existe deux raisons principales qui expliquent une telle corrélation : l'argument marketing ([Mahenc, 2008](#)) et le coût élevé pour obtenir un bon niveau de qualité environnementale ([Chen, 2001](#)). En effet, de nombreuses entreprises utilisent la qualité environnementale d'un produit comme un argument de marketing pour justifier un prix élevé d'un produit écologique. L'Eurobaromètre (2009) indique que 75% des clients européens, contre 31% en 2005, sont « prêts à acheter des produits respectueux de l'environnement, même s'ils coûtent plus chers ». Ainsi, les entreprises ont une plus grande flexibilité pour fixer le prix des produits verts par rapport aux produits ordinaires. Cette flexibilité dépend du niveau de la qualité environnementale du produit. De toute évidence, les entreprises devraient profiter de cette opportunité. Cependant, certains auteurs considèrent que, même si un nombre important de clients estiment que l'achat de produits verts a un impact positif sur l'environnement, il y a un « écart de conduite » entre les valeurs des consommateurs et leur comportement réel ([Young et al., 2010](#)). Une des raisons de cet écart est le prix élevé des produits verts par rapport aux produits ordinaires. Cela suppose implicitement que la fixation d'un prix relativement élevé pour un produit vert

conduit à perdre une partie de sa demande étant donné que même les consommateurs verts ne peuvent pas acheter ce produit.

Outre l'argument de marketing, de nombreux auteurs soutiennent qu'un produit vert est plus coûteux qu'un produit ordinaire. Selon [Chen \(2001\)](#), le coût élevé des produits verts est lié aux coûts élevés de l'activité de recherche et de développement (R & D) et du coût élevé des composants et des technologies vertes.

Il est important de signaler que dans certains cas, où les produits sont issus de recyclage et que leur remise à niveau ne nécessite pas un grand investissement technologique comme le cas des papiers recyclés, les coûts se voient réduits par rapport à un produit ordinaire similaire et le produit peut dans ce cas se vendre moins cher.

Dans la littérature existante, il y a deux points de vue différents sur les prix de vente et les coûts des produits écologiques ([Chen, 2001](#) ; [Young et al., 2010](#)). De nombreuses statistiques et des travaux de recherche estiment que les produits écologiques peuvent être vendus à des prix plus élevés. Tandis que d'autres auteurs considèrent que, pour des raisons de compétitivité, les produits écologiques ne devraient pas être plus chers que les produits ordinaires. Il est vraiment difficile d'avoir une réponse claire à cette question jusqu'à présent. En fait, ceci dépend du degré de sensibilité des clients envers les problèmes environnementaux. Cette sensibilité dépend de nombreux facteurs qui peuvent être éthiques, psychologiques ou même géographiques. Nous soulignons également que cette question est étroitement liée aux secteurs, et donc, à la nature des produits. Il est plus facile de vendre des produits écologiques à des prix plus élevés, lorsque ces produits ont un impact immédiat sur la santé humaine, comme la nourriture et les cosmétiques.

Il est clair qu'avec l'émergence de la question environnementale et le changement du comportement des clients envers la qualité environnementale des produits, le prix et la demande des produits ne peuvent plus être considérés comme des données d'entrée et des paramètres exogènes dans les modèles de conception des chaînes logistiques. Nous ne pouvons plus négliger le fait que le prix et la demande des produits dépendent de leurs niveaux de qualité environnementale. Ces trois paramètres : qualité environnementale, demande et prix de vente d'un produit sont corrélés. Il est important que cette corrélation soit prise en compte dans les modèles de conception des chaînes logistiques. Pour ce faire, il faut tout d'abord être capable de mesurer (quantifier) le niveau de la qualité environnementale d'un produit donné en fonction des décisions de conception de la chaîne logistique. La réponse à cette question est une tâche très difficile. Il y a beaucoup de travaux qui mettent l'accent sur

l'identification des facteurs qui influent sur la performance environnementale d'un produit (Borchardt, 2011; Gehin et al, 2008; Ljungberg, 2007; Kobayashi, 2006; Luttrupp et Lagerstedt, 2006 ; Ottman et al, 2006; etc.). Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de technique pour quantifier ou (mesurer) l'impact des activités des chaînes logistiques sur les performances environnementales des produits fabriqués. Conscients de l'importance de la considération de l'impact des activités logistiques sur la qualité environnementale des produits, nous pensons que nous devons apporter une réponse à cette dernière question afin d'être en mesure de construire des modèles de conception de chaînes logistiques qui permettent de répondre aux défis du contexte environnemental. Pour ce faire, nous devons tout d'abord étudier les facteurs qui déterminent la qualité environnementale des produits et surtout déterminer la relation entre la performance environnementale des produits et les décisions logistiques. Ceci est l'objet de la section suivante.

1.2 Relation entre les activités logistiques et la qualité environnementale des produits

La qualité environnementale des produits dépend naturellement des décisions liées au processus de conception du produit. Néanmoins, d'autres décisions qui ne sont pas liées à la conception du produit, peuvent également impacter sa qualité environnementale. Il s'agit des décisions de conception de la chaîne logistique. La figure 1.1 résume les principales décisions qui déterminent la qualité environnementale des produits.

Dans cette section, nous citons brièvement les décisions du processus de conception de produits. Puis nous nous intéressons de plus près aux décisions de conception des chaînes logistiques. Nous identifions les principales décisions qui ont une incidence sur la qualité environnementale des produits élaborés et nous indiquons comment la qualité environnementale des produits varie en fonction de ces décisions.



Figure 1.1. Déterminants de la qualité environnementale des produits

1.2.1 Les décisions du processus de conception de produit.

Les décisions relatives au processus de conception des produits définissent des attributs de la qualité environnementale du produit qui s'intègrent généralement dans la catégorie des « attributs intrinsèques », car ils font partie des caractéristiques physiques du produit (Chen, 2001). La qualité environnementale d'un produit est étroitement liée à son processus de conception. Des caractéristiques des produits telles que la durée du cycle de vie du produit, sa teneur en matière recyclée, sa recyclabilité ainsi que sa consommation d'énergie lors de la phase d'usage, sont des conséquences des décisions prises lors de la conception du produit, décisions qui ont sans aucun doute un impact important sur sa qualité environnementale (Chen, 2001). Comme mentionné précédemment, les attributs de la qualité environnementale des produits liés à leurs processus de conception, ne font pas l'objet de notre étude. Toutefois, le choix de type des composants qui est une décision relative au processus de conception du produit, est également une décision de conception de la chaîne logistique. En effet, le choix des composants peut être lié à la décision de sélection des fournisseurs et de mise en place de l'activité de recyclage. Nous détaillons ce point dans ce qui suit.

1.2.2 Les décisions de conception des chaînes logistiques.

Basé sur une revue de la littérature, nous classons les décisions de conception de la chaîne logistique en deux catégories. La première catégorie concerne les décisions qui modifient la qualité environnementale des produits en impactant directement ses caractéristiques intrinsèques. Cette catégorie inclut des décisions telles que le choix des fournisseurs en fonction de la nature des matériaux achetés (verts ou ordinaires) et l'implémentation des activités de recyclage. La deuxième catégorie regroupe les décisions de conception de la

chaîne logistique qui n'ont pas d'incidence directe sur les caractéristiques intrinsèques du produit mais qui impactent son image environnementale. Le nombre de kilomètres parcourus ainsi que les émissions de carbone du processus de production, etc., ne modifient pas les caractéristiques des produits. Cependant, ils sont considérés comme des attributs pertinents de la qualité environnementale.

1.2.2.1 Les décisions de conception de la chaîne logistique qui impactent les caractéristiques des produits.

La sélection des fournisseurs :

Pujari et al., (2003) indiquent que les fournisseurs ont un rôle important dans la définition des différents aspects de la qualité du produit, y compris la qualité environnementale. Le choix du type des matériaux (verts ou ordinaires) utilisés pour fabriquer un produit a une conséquence directe sur la performance environnementale du produit. Cette décision peut être liée aux décisions de sélection des fournisseurs. En effet, pour un composant donné, l'entreprise peut avoir le choix entre les fournisseurs ordinaires et les fournisseurs verts. Le fournisseur peut être considéré comme fournisseur vert, s'il offre des matériaux écologiques et / ou s'il a des certifications environnementales telles que la certification ISO 14000 (Sarkis, 2003). Le niveau de la qualité environnementale d'un produit (ou d'un composant) acheté auprès des fournisseurs verts est plus élevé que le niveau de la qualité environnementale de ce même produit s'il est acheté à des fournisseurs ordinaires. Toutefois, les prix peuvent être différents car généralement les composants verts sont plus chers.

La mise en place des activités environnementales.

Différentes activités environnementales, telles que le recyclage, le reconditionnement et la réutilisation, peuvent désormais être intégrées dans une chaîne logistique afin de réduire les impacts négatifs de ses activités sur l'environnement. Elles s'intéressent à la reprise des produits en fin de leurs cycles de vie, à leurs reconditionnements ou leurs recyclages.

En général, la mise en œuvre des activités environnementales améliore le niveau de la qualité environnementale des produits. En ce qui concerne la décision de recyclage, l'entreprise doit décider de la rentabilité de cette activité. Cette pratique peut remplacer l'achat de nouveaux composants et aussi augmenter le niveau de la qualité environnementale du produit, mais elle nécessite certainement un coût d'investissement.

Les activités environnementales ont été bien traitées dans la littérature, en particulier dans les travaux de la logistique inverse et en boucle fermée. Toutefois, les modèles de conception de la chaîne logistique qui étudient l'impact de ces activités sur la qualité environnementale des produits sont absents dans la littérature.

1.2.2.2 Les décisions de la chaîne logistique qui impactent l'image environnementales des produits.

Le choix des technologies de fabrication.

Selon [Ottman et al. \(2006\)](#), la qualité environnementale d'un produit dépend fortement des caractéristiques de son processus de fabrication. Les technologies de fabrication peuvent être différentes en termes de leurs niveaux d'émissions et de leurs consommations de ressources. Le choix d'une technologie donnée peut conduire à obtenir des produits qui sont similaires en termes de fonctionnalités mais qui diffèrent en termes de leurs qualités environnementales.

[Tsoulfas et Pappis \(2008\)](#) considèrent que les processus de production des entreprises reflètent leurs attitudes envers les questions environnementales. Avec l'émergence des questions environnementales, de nombreuses nouvelles technologies et différents modes de production sont apparus. Dans différents secteurs industriels, les entreprises ont désormais le choix entre l'utilisation des technologies ordinaires, connues pour être polluantes, et les technologies dites vertes (parfois appelées « propres ») et qui ont des émissions et des niveaux de consommation d'énergie inférieurs à ceux des technologies ordinaires. En utilisant les technologies vertes, les entreprises peuvent réduire nettement les émissions polluantes et la consommation d'énergie tout au long du processus de production et, par conséquent, améliorer l'image et la qualité environnementale des produits élaborés aux yeux des clients. Cependant, ces technologies vertes nécessitent généralement des coûts d'investissement importants qui incluent l'acquisition de ces nouvelles technologies et également les formations de main d'œuvre spécialisée. De nombreux travaux dans la littérature (par exemple, [Letmathe et Balakrishnan, 2005](#); [Radulescu et al, 2009](#)) proposent des modèles mathématiques pour l'optimisation de la production sous des contraintes environnementales. Ces travaux mettent l'accent sur la sélection de technologies de production avec comme objectif la réduction des émissions de gaz conformément aux législations environnementales. Toutefois, aucun de ces travaux ne soulève l'impact du choix des technologies de production sur la qualité environnementale des produits obtenus.

Localisation des sites.

La distance totale parcourue par un produit, qui est souvent utilisée comme critère de qualité environnementale, dans l’affichage environnemental de plusieurs produits sur les marchés, ne dépend pas des caractéristiques intrinsèques du produit, mais plutôt des décisions de localisation des sites. Les impacts des décisions de localisation des sites sur la performance environnementale des produits ont été rarement considérés dans la littérature. La localisation des sites de production et de distribution influent sur les distances parcourues et donc sur la consommation de carburants et les émissions de carbone. Par conséquent l’emplacement des sites peut avoir un impact significatif sur la qualité environnementale des produits. Après les mouvements de délocalisation basés sur des critères économiques de réduction des coûts d’investissement et de main d’œuvre, nous assistons aujourd’hui dans certains secteurs à une nouvelle relocalisation des entreprises basée sur des critères environnementaux visant à se rapprocher des fournisseurs et/ou des clients finaux afin de minimiser les distances parcourues. Dans le secteur agro-alimentaire spécialement, les clients favorisent des produits locaux. Cette tendance s’étend à d’autres secteurs comme celui du textile.

La sélection des modes de transport.

Les impacts du transport sur l’environnement sont indéniables de nos jours. Dans le secteur du transport de marchandises, les consommations d’énergie et les émissions de gaz à effet de serre dépendent fortement de l’organisation de la chaîne logistique mais aussi des choix des modes de transports. Le secteur du transport est le premier consommateur de produits pétroliers et le premier émetteur de gaz à effet de serre (CEMT, 2007, voir figure 1.2). Le transport routier est en tête de classement en terme d’émissions de gaz à effet de serre, suivi dans l’ordre par le transport aérien, le transport maritime et enfin le transport ferroviaire.

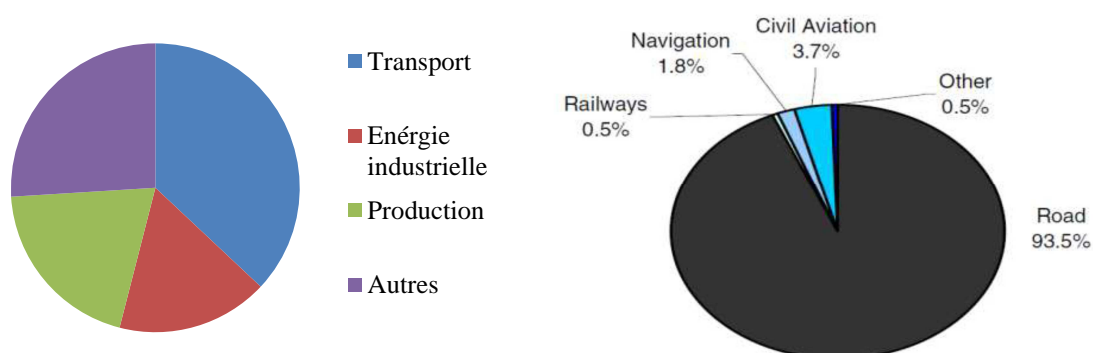


Figure 1.2. Part des émissions de CO2 liées au transport (CEMT, 2007)

Le choix des liaisons de transport entre les différents nœuds de la chaîne logistique et le choix des modes de transport à utiliser sur chaque lien déterminent les émissions de gaz et la consommation d'énergie pendant le transport. La conception et la planification efficace des activités de transport est un facteur crucial pour réduire les émissions de carbone dans une chaîne logistique. Plusieurs entreprises utilisent le taux de carbone émis pour le transport d'un produit comme indicateur de qualité environnementale pour leurs produits. La réduction des taux des émissions de carbone dans la chaîne logistique permet d'améliorer la qualité environnementale des produits issus.

Pour plusieurs secteurs industriels, tels que le textile, le fret aérien présente l'avantage d'une grande réactivité, moyennant des coûts environnementaux et financiers importants. Vu les changements du contexte environnemental, il est donc impératif pour certaines entreprises de réviser leurs systèmes logistiques afin de réduire l'impact de leurs activités de transport sur l'environnement et de s'orienter vers des modes ayant moins d'impacts sur l'environnement, tels que le rail et les voies navigables.

Ainsi, les décisions relatives à la conception des chaînes logistiques décrites ci-dessus doivent être considérées en tenant compte de leurs impacts sur le niveau de la qualité environnementale des produits fabriqués. Il est très important de quantifier l'impact de chaque décision afin de déterminer le niveau de la qualité environnementale des produits obtenus. Il s'agit d'une tâche très difficile pour laquelle on ne trouve aucune réponse dans la littérature à ce jour.

1.3 Revue de la littérature et classification des modèles existants

En se basant sur les différentes caractéristiques du problème de conception de la chaîne logistique dans un contexte environnemental, définies ci-dessus, nous nous intéressons aux travaux basés sur des modèles mathématiques et nous étudions dans cette section, comment les modèles de conception de la chaîne logistique sont adaptés au contexte environnemental à même de nous aider à réaliser notre système de décision.

L'intégration des questions environnementales dans les chaînes logistiques a été considérée depuis les années 90. Parmi les premiers travaux, nous citons celui de [Hartl et Kort \(1997\)](#). Les auteurs établissent un modèle mathématique décrivant le comportement de l'entreprise,

sous des contraintes de limitation des émissions. Les auteurs ont supposé que, dans le court terme, l'entreprise dispose de deux possibilités pour réduire ses propres émissions : (1) diminuer la production en laissant une certaine capacité de production inutilisée, ou (2) avoir recours à des processus de production plus écologiques mais également plus chers. Les auteurs étudient les deux scénarios en considérant différents niveaux de limitations des émissions allant vers des niveaux de plus en plus faibles et serrés. Ils ont également étudié des situations où les gouvernements offrent des incitations financières pour l'utilisation des processus écologiques. Les auteurs concluent qu'en absence d'incitations financières, les entreprises n'optent pour le remplacement des processus polluants par ceux écologiques que lorsque les valeurs seuils des polluants sont atteintes.

Plusieurs autres travaux se sont intéressés aux problèmes de planification de la production en tenant compte des questions environnementales. [Wu et Chang \(2004\)](#) présentent un programme optimal de planification de la production en tenant compte des coûts environnementaux. Les auteurs considèrent un modèle multi-objectif qui permet de (1) minimiser les coûts de production, (2) maximiser la capacité de production et (3) minimiser les coûts de stockage. Les coûts environnementaux ont été intégrés dans les différents coûts de l'entreprise (coûts de production et coûts de stockage). Une application de ce modèle sur l'industrie de textile de Taiwan a été présentée.

[Letmathe et Balakrishnan, \(2005\)](#) sont parmi les auteurs qui se sont intéressés à l'activité de production sous des contraintes environnementales. Les auteurs présentent deux modèles mathématiques qui illustrent comment différentes législations environnementales telles que les seuils d'émission et les permissions des émissions négociables peuvent être intégrées dans les modèles de planification de la production. Les auteurs considèrent que pour la fabrication d'un produit donné, il existe plusieurs processus de production qui diffèrent par leurs niveaux d'émissions polluantes, leurs consommations d'énergie et de ressources. Le premier modèle permet de choisir un seul processus de production pour toute la quantité produite. Tandis que le deuxième modèle suppose qu'une production mixte peut être envisagée, ce qui entraîne la sélection de plus d'un procédé de production. Le modèle permet alors de déterminer quelle combinaison de processus peut être déployée afin de maximiser les bénéfices de l'entreprise, tout en veillant à la conformité aux lois environnementales limitant les niveaux des émissions de l'entreprise. Les auteurs intègrent dans ce travail les formes les plus courantes de

législations environnementales : (1) des valeurs seuils d'émission qui ne peuvent être dépassées, (2) des taxes (pénalités) en fonction de la quantité des émissions, et (3) des permissions d'émission négociables.

[Radulescu et al. \(2009\)](#) présentent deux modèles de planification de la production en tenant compte à la fois des questions économiques et environnementales dans un environnement incertain. Les modèles peuvent être considérés comme des modèles de prévention de la pollution. Les auteurs ont formulé deux problèmes de programmation stochastique. L'objectif du premier modèle est de maximiser le profit de l'entreprise, tandis que le deuxième minimise les risques environnementaux en agissant sur les taux des émissions. Ces modèles visent à obtenir des plans optimaux de production pour une entreprise du secteur de textile.

[Chen et Monahan \(2010\)](#) analysent et comparent les impacts d'une approche législative et une approche volontariste des entreprises pour le contrôle de la pollution sur les décisions de production et de stockage d'une part, et sur les conséquences environnementales, d'autre part. Les auteurs considèrent le cas où les émissions dégagées par l'activité de production de l'entreprise sont limitées par une valeur seuil des émissions imposée par les règlements législatifs. La violation de ce seuil d'émissions est strictement interdite. Puis ils étudient la situation dans laquelle l'entreprise met en place un objectif environnemental volontaire pour le contrôle de la pollution. [Chen et Monahan \(2010\)](#) avancent que, dans le premier cas, l'entreprise accumule des stocks de sécurité que les auteurs appellent stocks de sécurité environnementale et pour faire face aux incertitudes des problèmes environnementaux qui impactent les valeurs seuils d'émissions imposées par les gouvernements. Pour faire face à cette incertitude, tant qu'elles ne dépassent pas les seuils des émissions imposés par les gouvernements, les entreprises continuent à produire même plus que la demande et font ainsi des stocks supplémentaires. Ceci augmente l'impact environnemental de la phase de stockage vue l'augmentation des stocks de sécurité environnementale. Une telle pratique, peut entraîner le transfert des risques et des problèmes environnementaux d'une certaine période de l'horizon de planification à d'autres périodes ou à partir d'un certain stade du cycle de vie du produit à d'autres stades. Cependant l'approche volontariste offre aux entreprises plus de flexibilité lui permettant ainsi une meilleure planification de la production et une meilleure gestion et contrôle des risques environnementaux.

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs travaux qui portent sur l'évaluation des impacts de l'activité de transport sur l'environnement. [Rondinelli et al. \(2000\)](#) proposent une approche intégrée visant à prévenir la pollution et à réduire les sources de dégradation de l'environnement causées par le transport en utilisant le transport intermodal.

[Sawadogo et Anciaux \(2010\)](#) proposent un modèle multi-objectif visant à réduire les impacts environnementaux des systèmes de transport multimodaux. L'objectif du modèle proposé est de réduire les coûts et les délais de transport ainsi que les impacts socio-environnementaux des systèmes de transport intermodal. Les critères socio-environnementaux considérés sont la pollution de l'air (émissions de gaz), la consommation d'énergie et la pollution sonore (bruit des moyens de transport). D'autres travaux qui se sont intéressés à la réduction de l'impact environnemental de l'activité de transport sont ceux de [Piecyk et McKinnon \(2007\)](#), [Forkenbrock \(2001\)](#), [Janic \(2007\)](#) et [Ricci et Black \(2005\)](#).

Certains travaux ont présenté des modèles de conception de chaîne logistique en tenant compte des aspects environnementaux. Parmi ces travaux nous citons ceux de [Berna \(2002\)](#), [Quariguasi Frota Neto et al. \(2008, 2009\)](#) et [Chaabane et al. \(2012\)](#). [Berna \(2002\)](#) présente un modèle de conception des chaînes logistiques en intégrant différents aspects environnementaux (activités environnementales, coûts environnementaux, etc.). L'auteur propose un modèle de programmation mixte en nombres entiers pour la conception d'une chaîne logistique verte dans un contexte multinational. Ce modèle intègre les activités logistiques ainsi que les activités de la logistique inverse en tenant compte des aspects du commerce international (taux de change, impôts, etc.). Les entrées du modèle sont les suivantes : la demande des clients, les coûts d'ouverture des sites, les coûts de la logistique inverse (coûts de traitement / d'élimination / de reconditionnement des produits), la capacité des sites, les impôts et taux de change, les coûts de transport, etc. Les décisions du modèle concernent la localisation des sites de production et de collecte des produits, les quantités de produits neufs fabriqués ainsi que la quantité des produits re-fabriqués, les niveaux des stocks, les canaux de transport à utiliser et le nombre de transporteurs.

[Quariguasi Frota Neto et al. \(2008\)](#) proposent un modèle de programmation multi-objectif pour le cas d'une entreprise de l'industrie européenne du papier. Dans ce modèle, le premier objectif est la minimisation des impacts environnementaux des activités de l'entreprise (réduction des déchets) et le deuxième objectif est la minimisation des coûts (de production,

d'incinération des déchets, de recyclage et de transport des papiers en fin de cycle de vie). Les décisions sont les suivantes: les quantités de production (en papier recyclé et en papier non recyclé) et le choix des canaux de transport.

Quariguasi Frota Neto et al. (2009) proposent un modèle pour la conception d'un réseau logistique de recyclage en Allemagne. Grâce à ce modèle, les auteurs cherchent la solution optimale qui concilie les préoccupations environnementales et économiques de la chaîne logistique. Les décisions du modèle sont le nombre d'opérations de recyclage à exécuter et les flux entre les différents sites de traitement, de collecte et de recyclage. Le modèle proposé est un programme multi-objectif linéaire avec trois objectifs : minimiser les coûts, minimiser la consommation d'énergie et minimiser les déchets rejetés.

Chaabane et al. (2012) présentent un modèle de programmation linéaire multi-objectif pour la conception d'une chaîne logistique durable. L'objectif environnemental est de minimiser les émissions de gaz à effet de serre. Les décisions du modèle sont principalement : la localisation des sites, la sélection des fournisseurs, la sélection de technologies de production et la sélection des moyens de transport. L'auteur considère les réglementations environnementales liées aux permissions d'émission négociables.

Le tableau 1.1 résume les travaux basés sur des approches analytiques et plus précisément sur des modèles mathématiques pour la conception des chaînes logistiques avec considération des aspects environnementaux. Les articles sélectionnés sont ceux qui abordent la plupart des aspects environnementaux identifiés dans le présent travail. Les principaux critères de classification sont la prise en compte de la qualité environnementale des produits fabriqués, la modélisation de la corrélation entre la qualité environnementale des produits, la demande et le prix de vente. Nous avons aussi classé ces travaux selon les activités logistiques considérés. Notre objectif est de montrer jusqu'à quel niveau les modèles existants de conception des chaînes logistiques supportent les caractéristiques identifiées jusqu'ici pour la conception de la chaîne logistique sous des aspects environnementaux.

Ces travaux sont: {1} Chen et Monahan (2010); {2} Chaabane et al. (2012); {3} Ülengin et al. (2010), {4} Radulescu et al. (2009); {5} Quariguasi Frota Neto et al. (2009); {6} Quariguasi Frota Neto et al. (2008); {7} Letmathe et Balakrishnan (2005); {8} Wu et Chang

(2004); {9} Jayaraman et al. (2003), {10} Berna (2002); {11} Chen (2001); {12} Dobos
(1999); {13} Hartl et Kort (1997).

Tableau 1.1. Classification des modèles existants selon les aspects environnementaux identifiés

	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}
Demande fonction de la qualité environnementale des produits											X		
Prix fonction de la qualité environnementale des produits											X		
Qualité environnementale des produits quantifiée en fonction des décisions logistiques													
Réglementations environnementales	X	X		X			X	X				X	X
Activités environnementales: - Recyclage - Refabrication - Traitement des déchets et des émissions		X			X	X X X			X X	X			
Sélection des technologies de production selon leurs impacts environnementaux		X		X			X						X
Sélection des modes et chaines de transport selon leurs impacts environnementaux		X	X			X				X			
Localisation des sites selon leurs impacts environnementaux		X								X			
Sélection des fournisseurs selon leurs impacts environnementaux		X											

En observant le tableau 1.1, nous concluons ce qui suit :

- La corrélation entre la qualité environnementale du produit, sa demande et son prix de vente est presque ignorée dans les modèles mathématiques de conception des chaînes logistiques.
- La littérature manque de travaux qui modélisent et quantifient l'impact des décisions logistiques sur la qualité environnementale des produits.
- La plupart des modèles de conception de chaînes logistiques qui traitent les questions environnementales se concentrent principalement sur l'intégration des activités environnementales. Cependant, les activités environnementales sont généralement considérées comme une solution de conformité aux réglementations. L'impact de ces activités sur la qualité environnementale des produits est ignoré dans les modèles existants.
- Bien que la localisation des sites, la sélection des modes de transport et le choix des technologies de production soient considérés dans certains travaux qui s'intéressent à la conception des chaînes logistiques vertes, la sélection des fournisseurs a été ignoré. Cependant, nous soulignons qu'il existe de nombreuses études empiriques portant sur la sélection des fournisseurs sous contraintes environnementales (Bala et al., 2010 ; Humphreys et al., 2003 ; Handfield et al., 2002 ; etc.) mais ce problème est généralement ignoré dans les modèles mathématiques.

Cette étude de la littérature ciblée sur les modèles mathématiques montre clairement l'importance de l'étude de l'impact des activités logistiques sur l'environnement. Elle nous indique également que plusieurs auteurs ont développé des modèles mathématiques pour résoudre des problèmes spécifiques à cet égard et que les travaux existants mettent l'accent sur quelques activités isolément des autres activités de la chaîne logistique. Il n'existe pas de modèles mathématiques complets qui abordent simultanément les multiples aspects environnementaux évoqués dans ce travail (la prise en compte de la qualité environnementale des produits, la corrélation entre la demande, le prix de vente et la qualité environnementale des produits, etc.). Aucun des modèles existants de conception de chaînes logistiques ne considère simultanément les différents processus et activités logistiques. Cependant, lorsque nous étudions l'impact environnemental des activités logistiques, il est important d'avoir une vision globale qui intègre l'essentiel des activités logistiques. Optimiser l'impact d'une seule activité isolément des autres peut conduire à améliorer la performance environnementale de cette activité au détriment des autres. Par exemple, si nous considérons un problème de sélection des fournisseurs en fonction des critères environnementaux (composants verts, audit

et certification environnementaux) sans tenir compte de l'activité de transport, nous risquons d'augmenter le nombre de kilomètres parcourus lors de l'acquisition des composants et le taux d'émission de carbone. Pour une meilleure performance environnementale, et afin de se conformer aux différentes législations environnementales, il serait important d'envisager des modèles globaux qui permettent d'optimiser les différentes activités logistiques.

Le framework présenté dans la section suivante est une tentative pour apporter des réponses aux différentes problématiques soulevées dans les sections précédentes et pour combler les lacunes identifiées dans la littérature.

1.4 Démarche générale

Sur la base des caractéristiques du problème de conception de chaînes logistiques vertes identifiées au début de ce chapitre, nous proposons, dans cette section, différentes lignes directrices et des recommandations qui peuvent aider à développer un modèle d'optimisation pour la conception des chaînes logistiques vertes. La démarche proposée s'articule autour de quatre axes principaux :

- Intégrer les différentes (ou du moins les principales) décisions de conception des chaînes logistiques qui influent sur la performance environnementale du produit fini ;
- Intégrer une méthode pour quantifier et mesurer la performance environnementale du produit fini en fonction des décisions du modèle ;
- Intégrer la relation entre le niveau de la qualité environnementale du produit fini, sa demande, et son prix de vente ;
- Prendre en compte les lois et les politiques environnementales des gouvernements.

Nous détaillons cette démarche à travers la description de ces quatre axes ci-dessous.

1.4.1 Intégration des décisions de conception de chaînes logistiques ayant des impacts environnementaux

Le modèle de conception des chaînes logistiques doit d'abord saisir les compromis entre les coûts et les avantages d'une approche environnementale dans les chaînes logistiques. Les coûts environnementaux se réfèrent, par exemple, aux coûts d'achat des composants verts, de sélection des fournisseurs verts, de mise en œuvre des technologies vertes et des activités environnementales de la logistique inverse. Les avantages d'une approche environnementale comprennent principalement les revenus provenant de la vente des produits avec un certain niveau de qualité environnementale. Ainsi, un modèle de conception des chaînes logistiques

qui tient compte des questions environnementales devrait intégrer les décisions des chaînes logistiques qui ont un impact sur l'environnement en général et sur la qualité environnementale des produits fabriqués en particulier. Nous rappelons que les principales décisions dans ce cas sont les suivantes :

- Sélection de technologies. Est-ce que l'entreprise doit adopter une technologie verte ou plutôt une technologie ordinaire ? Quels niveaux et quels types d'émissions polluantes sont associés à la technologie adoptée ? Quel est le niveau de consommation des ressources ? Quelles quantités de rejets et de déchets solides sont dégagées ?
- Sélection de modes de transport. Est-ce que l'entreprise doit utiliser un mode de transport à faible émission de gaz ou plutôt des modes de transport plus émetteurs de gaz mais qui sont plus rentables en termes de coûts, de volume transporté ou de délais, etc. ?
- Localisation des sites. Est-ce que l'entreprise doit opter pour des sites de production qui sont géographiquement proches des fournisseurs et/ou des clients finaux mais qui coûtent chers ou plutôt privilégier des sites distants avec des coûts d'installation et de mains d'œuvre réduits ?
- La sélection des fournisseurs. Quels fournisseurs doit-on choisir (verts ou ordinaires / locaux ou distants)?

1.4.2 Une méthode pour quantifier la performance environnementale du produit

La qualité environnementale d'un produit est une notion relative qui peut être perçue différemment par les différents acteurs et pour laquelle il n'existe pas encore de définition standard. Trouver une méthode pour quantifier la performance environnementale d'un produit en fonction des décisions de la chaîne logistique est donc une tâche difficile. La première difficulté est de mesurer l'impact de chaque décision sur la qualité environnementale du produit.

Une fois que l'impact de chaque décision est quantifié, nous devons trouver un moyen d'homogénéiser tous les résultats obtenus afin d'obtenir une valeur unique qui mesure la qualité environnementale du produit. Il s'agit, encore une fois, d'une tâche difficile car les impacts environnementaux des activités de la chaîne logistique ne sont pas tous de même nature. Par exemple, l'activité de transport a un impact sur les émissions de CO₂ ; l'impact environnemental majeur de la sélection des fournisseurs est représenté par la qualité environnementale des composants achetés et la localisation des fournisseurs ; le choix de technologies a un impact sur les émissions de gaz (pas seulement le CO₂) et la consommation

d'énergie et de ressources ; la mise en œuvre d'une activité de recyclage a un impact sur le taux de recyclabilité, etc.

Afin de réaliser des progrès dans ce domaine de recherche, certaines hypothèses doivent être envisagées. Une approche justifiable pour mesurer la qualité environnementale des produits pourrait consister à identifier des attributs de qualité environnementale du produit. Du point de vue conception de chaîne logistique, ces attributs peuvent être : la quantité d'émissions de gaz, la quantité d'énergie consommée, la quantité de déchets, et le taux de composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini.

1.4.3 Modélisation de la relation entre qualité environnementale, demande et prix d'un produit

Comme indiqué précédemment, un modèle de conception de chaînes logistiques qui s'intéresse aux aspects environnementaux doit tenir compte de la corrélation qui existe entre la demande, le prix et la qualité environnementale des produits finis. Répondre à cette problématique est également un nouveau défi puisque cette relation dépend de nombreux facteurs tels que le type de produit, la concurrence sur le marché, le comportement des consommateurs, etc. Certaines hypothèses doivent alors être faites.

On peut, par exemple, supposer que la demande est fixée à l'avance (paramètre d'entrée) et on exprime le prix en fonction de la qualité environnementale des produits. [Chen \(2001\)](#) adopte cette politique et suppose que le prix du produit augmente en fonction du niveau de sa qualité environnementale. Une autre démarche peut consister à fixer le prix et exprimer la demande en fonction de la qualité environnementale du produit. Par exemple, on peut supposer que, pour un prix donné, la demande augmente en fonction de l'augmentation de sa qualité environnementale. Cela peut se justifier par le fait que des consommateurs écologiques vont acheter le produit. Dans les deux cas, la question clé est de savoir comment le prix (respectivement, la demande) varie en fonction de la qualité environnementale du produit.

De toute évidence, de nombreux efforts sont encore nécessaires pour trouver une méthode efficace pour modéliser la relation entre la qualité environnementale, la demande et le prix d'un produit.

1.4.4 Intégration des politiques environnementales des gouvernements

Les politiques et les lois environnementales des gouvernements doivent être prises en compte dans les modèles de conception des chaînes logistiques. Comme précisé précédemment, il existe différents types de réglementations environnementales. Les moyens d'intégrer ces règles dans un modèle mathématique de conception des chaînes logistiques dépendent du type de chaque réglementation. Certaines réglementations doivent être prises en compte dans la fonction objectif, tandis que les autres doivent être prises en compte dans les contraintes du modèle.

Dans la fonction objectif, nous considérons :

- Les pénalités environnementales et les taxes qui doivent être payées en cas de violation de la réglementation environnementale ;
- Les incitations environnementales qui sont obtenues si l'entreprise améliore sa performance environnementale et réduit les impacts négatifs de ses processus de production sur l'environnement ;
- Les profits réalisés par la vente des permissions d'émission négociables entre les entreprises.

Ainsi, lorsque les aspects environnementaux sont de majeure importance, il n'est pas pertinent de considérer une fonction objectif qui minimise les coûts de l'entreprise comme c'est le cas dans de nombreux modèles de conception des chaînes logistiques dans la littérature. Il est plus pertinent de considérer plutôt la maximisation du profit où on inclut les revenus et les coûts environnementaux étudiés et présentés dans ce chapitre.

Dans les contraintes du modèle, il faut considérer les réglementations qui imposent des valeurs seuils qui ne peuvent pas être dépassées. Dans ce cas, nous devons inclure des contraintes du type : le niveau d'émission d'un procédé de fabrication donné doit être inférieur au niveau maximal d'émission autorisé.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les facteurs pertinents qui devraient être inclus dans un modèle de conception de chaîne logistique pour qu'il soit adapté au contexte environnemental. Parmi les facteurs les plus importants qui ont été signalés, nous citons les décisions de choix de technologies, de choix de fournisseurs et de localisation des sites de production. A ces facteurs s'ajoutent la prise en compte de la qualité environnementale des

produits fabriqués, la relation entre la demande, le prix de vente et la qualité environnementale des produits, et les législations environnementales.

Nous avons ensuite présenté une démarche générale de modélisation permettant d'aboutir à un modèle de conception de chaîne logistique dans le contexte environnemental. Le modèle analytique doit être construit conformément à cette démarche en tenant compte des paramètres identifiés tout au long de ce chapitre. Plusieurs questions soulevées dans cette démarche générale concernant la modélisation de la performance environnementale et la modélisation de la demande, trouveront leurs réponses dans le chapitre 2. Dans le chapitre 3, nous décrivons un cas réel du secteur textile qui nous permet d'illustrer notre démarche tout au long des chapitres suivants. Dans les chapitres 4 et 5, nous nous focalisons sur la formulation mathématique du problème de conception de chaîne logistique dans le contexte environnemental.

Chapitre II : Modélisation de la qualité environnementale des produits et modélisation du marché

Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons mis l'accent sur l'importance de prise en compte de la qualité environnementale des produits et la nécessité de modéliser la relation entre la qualité environnementale, le prix et la demande d'un produit dans les modèles d'optimisation des activités de la chaîne logistique. Nous avons montré que la littérature manque de tels modèles et nous avons mis en évidence les besoins en termes de modélisation. Le présent chapitre a pour objectif de répondre à ce besoin. Il porte tout d'abord sur la modélisation de la qualité environnementale du produit en fonction des décisions de conception de la chaîne logistique et ensuite sur la modélisation du marché (demande et prix) en fonction de la qualité environnementale des produits fabriqués. Nous montrons que selon la stratégie des sociétés et la structure du marché, deux modélisations différentes du marché peuvent être proposées.

2.1 Modélisation de la qualité environnementale des produits

Modéliser la qualité environnementale des produits en fonction des décisions logistiques est une tâche difficile qui n'a pas reçu beaucoup d'intérêt dans la littérature existante. En effet la première difficulté réside comme signalé avant, dans la diversité de la nature des impacts des décisions logistiques sur la qualité environnementale du produit. Sur le marché, certaines approches essaient de caractériser l'effet des décisions logistiques sur les produits. Nous citons par exemple l'approche « Food miles » qui consistent à afficher sur les produits le nombre des kilomètres parcourus. Nous citons également l'affichage du taux de recyclabilité d'un produit, le taux de composants biologiques dans le produit ou le bilan carbone. Toutefois, aucune de ces méthodes ne permet d'obtenir une vision de tous les impacts environnementaux générés pour la fabrication d'un produit. La mise en place d'un système multicritère de mesure de la qualité environnementale d'un produit est nécessaire. Une approche naturelle consiste à identifier différents attributs environnementaux qui permettent de caractériser la qualité environnementale d'un produit. Dans ce travail de thèse, nous avons défini trois attributs environnementaux pour caractériser la qualité environnementale, dépendant des décisions de la chaîne logistique. Ces attributs sont la quantité de carbone dégagée par l'activité de transport, le taux des émissions polluantes dégagées par les procédés de production et le taux des composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini.

Une deuxième difficulté de la mesure de la qualité environnementale, réside dans le choix de l'approche de mesure. Il existe principalement deux approches pour la mesure

environnementale. La première approche repose sur la mesure brute en considérant simplement la quantité des émissions dégagées (en grammes). Cette approche est la plus utilisée pour l’affichage de la performance environnementale des produits sur le marché. Toutefois, nous pensons que cette méthode présente un manque de lisibilité pour les clients qui ne saisissent pas aisément la pertinence des chiffres et leurs significations environnementales. En effet, il n’est pas évident pour les clients de saisir la pertinence du nombre de grammes de carbone affiché sur les produits.

La deuxième approche considère une mesure basée sur une comparaison par rapport à une situation de référence. Dans notre travail, nous avons opté pour cette approche. L’avantage de cette approche est de permettre aux clients de comparer aisément un produit donné avec ses concurrents sur le marché en termes de performance environnementale. Les clients peuvent ainsi se rendre compte de l’effort fourni pour l’amélioration de la qualité environnementale du produit par rapport à une situation de référence. Toutefois, il est vrai que ce type de mesure dépend fortement de la définition de la situation de référence et les résultats peuvent être biaisés par le choix de cette référence. Pour que cette méthode soit pertinente, des efforts de normalisation sont nécessaires pour définir des situations de référence fiables mais avec un cadre de normalisation régi par un organisme de normalisation de référence (exemple l’AFNOR¹), les clients compareraient aisément deux produits donnés entre eux.

Ainsi, une vraie difficulté de ce travail, est de définir la référence pour la mesure de la qualité environnementale. Une solution consiste à considérer la situation la plus usuelle quand les contraintes environnementales sont ignorées, comme une situation permettant de définir la référence de mesure pour chacun des attributs environnementaux précédemment définis. Dans ce qui suit, nous décrivons pour chaque attribut environnemental étudié, la situation de référence correspondante.

Une fois l’impact de chaque décision quantifié, les différents attributs et les références de mesure définis, nous devons trouver un moyen d’homogénéiser les résultats obtenus afin d’obtenir un indicateur global qui mesure la qualité environnementale du produit. Il s’agit, encore une fois, d’une tâche difficile car les impacts environnementaux des activités de la chaîne logistique ne sont pas tous de même nature. Une solution possible est de normaliser les différents attributs.

¹ Association Française de Normalisation

Pour ce faire, nous nous sommes tout d'abord basés sur une approche identifiée dans les travaux de [Chen \(2001\)](#) et [Debo et al., \(2005\)](#) qui supposent que la qualité environnementale des produits varie entre 0 et 1. Toutefois, les auteurs n'explicitent pas l'expression de l'attribut environnemental et le principe de sa mesure. Nous avons alors considéré une valeur de référence pour le calcul de chaque attribut. D'une manière générale, l'attribut environnemental s'écrit sous la forme suivante : $attribut = \frac{Reference - Mesure}{Reference}$. Ainsi, chacun des attributs définis varie entre 0 et 1. Grâce à cette démarche, nous allons pouvoir normaliser les différentes valeurs des attributs environnementaux pour pouvoir calculer une valeur globale de la qualité environnementale.

Dans ce qui suit, nous décrivons chacun des trois attributs considérés et la référence de mesure correspondante en détail.

Taux des émissions de carbone. Il s'agit des émissions de carbone dégagées lors des différentes activités de transport réalisées sur les différentes liaisons de la chaîne logistique (depuis les fournisseurs jusqu'aux sites de production et des sites de production vers le client). Le niveau des émissions dépend principalement de deux facteurs : la distance totale parcourue et le mode de transport utilisé. La distance totale parcourue par un produit dépend bien sûr des décisions de sélection des fournisseurs en termes de leurs emplacements géographiques ainsi que des décisions de localisation des sites de production. Tandis que le choix du mode de transport utilisé correspond aux décisions liées à la stratégie de l'entreprise par rapport à l'activité de transport. L'attribut de la qualité environnementale lié aux émissions de carbone, que nous notons dans toute la suite de ce manuscrit par β , dépendra de la quantité de carbone liée aux transports des composants vers les sites de production et du produit fini vers le client. L'attribut β est relatif à la stratégie de transport considérée par l'entreprise. Pour des raisons d'homogénéisation citées précédemment et pour éviter des mesures brutes non significatives, cet attribut sera calculé comme étant le taux de réduction des émissions de carbone par rapport au niveau d'émission de référence que nous notons ω^{max} . La référence ω^{max} est définie comme étant la valeur des émissions de carbone dégagée lorsque la qualité environnementale des produits n'est pas prise en compte. Dans le chapitre 4, nous donnons plus de précisions sur la détermination de la valeur de la référence ω^{max} .

L'attribut de la qualité environnementale β est calculé alors selon la formule suivante :

$\beta = \frac{\omega^{max} - \sum \text{émission carbone}}{\omega^{max}}$. Ainsi β varie entre 0 et 1. Si $\beta = 0$ ceci correspond à une valeur

minimale de cet attribut environnemental ; plus la valeur de β tend vers 1, plus la qualité environnementale du produit est bonne.

Taux des émissions polluantes lors de la production. Il s'agit de la quantité totale des gaz polluants dégagés par le processus de production. En effet, dans les différents secteurs industriels, nous retrouvons des procédés et des technologies de production différentes. Ces technologies vont des technologies les plus polluantes (appelées également ordinaires) vers les technologies les plus propres (vertes). Ces technologies diffèrent par le type et le taux des émissions polluantes dégagées ainsi que par la quantité des énergies consommées et des ressources utilisées. Dans ce travail, nous allons mettre l'accent sur le type et les quantités des émissions polluantes dégagées par les procédés de production. Pour améliorer l'attribut environnemental lié aux choix de technologies de production, l'entreprise aurait à choisir parmi un ensemble potentiel de technologies entre des technologies propres généralement avec des coûts élevés et des technologies ordinaires généralement plus polluantes mais moins coûteuses. L'attribut de la qualité environnementale lié aux émissions des technologies de production que nous notons λ , est calculé comme étant le taux de réduction des émissions de gaz qui peut être atteint en utilisant un processus de production donné par rapport au niveau d'émission de référence appelé ε_{\max} . La situation de référence dans ce cas peut considérer les émissions du procédé de fabrication le plus utilisé par les industriels du secteur étudié. Dans la situation où les questions environnementales sont ignorées, ceci correspond généralement, au procédé de fabrication le moins cher. λ est donné par la formule suivante : $\lambda = \frac{\varepsilon_{\max} - \sum \text{émissions des différents polluants}}{\varepsilon_{\max}}$. Ainsi l'attribut λ est lié à la décision de choix de la technologie de production. Dans le chapitre 5, nous donnons plus de précision sur la détermination de la valeur de ε_{\max} . Ainsi λ varie entre 0 et 1. Si $\lambda = 0$ ceci correspond à l'utilisation du procédé de production le plus polluant. Plus la valeur de cet attribut s'approche de 1, plus ce produit est vert.

Taux des composants verts. Le type des composants utilisés a un impact très important sur la qualité environnementale des produits. Un composant écologique peut être un composant biologique issu de ressources naturelles ou bien issu de recyclage ou également issu de processus de production écologique. Il faut toutefois noter que l'utilisation des produits biologiques ou des composants issus d'origine naturelle ne signifie pas que ces composants ne sont pas néfastes pour l'environnement. En effet, ces produits naturels ou agricoles issus de

l'agriculture biologique peuvent émettre plus de gaz à effet de serre qu'un produit conventionnel. Il faudrait privilégier les produits issus d'une agriculture biologique où l'utilisation des pesticides est contrôlée et réduite. Il est clair que le choix de type de composants est étroitement lié aux décisions de choix des fournisseurs. Car un fournisseur donné peut offrir des composants de type ordinaire ou verts. L'attribut de qualité environnementale lié au taux des composants verts utilisé est noté ψ . Cet attribut va dépendre du nombre de composants verts utilisés pondéré par l'importance de chacun. Notons que nous utilisons la notion de composant dans un sens très large. Un composant peut être utilisé au sens premier du terme (une sous-partie du produit fini) comme il peut désigner aussi une matière première achetée pour fabriquer le produit fini. Le calcul de cet attribut est donné par la formule suivante $\psi = \sum_{r=1}^R \mu_r v_r$ avec R , le nombre total des composants, v_r une variable binaire qui indique si le composant r est vert ou pas et μ_r représente le poids du composant r dans la composition du produit fini en termes d'impact environnemental. La somme $\sum_{r=1}^R \mu_r$ est égale à 1. Par exemple, si la qualité environnementale du produit fini est calculée en fonction du nombre de ses composants verts par rapport au nombre total de composants alors μ_r représente le ratio : nombre de composants r utilisés / nombre total de composants utilisés. Si la qualité environnementale dépend fortement d'un composant particulier qui s'avère par exemple nocif à l'environnement (tel que le mercure dans les piles) alors dans ce cas, μ_r serait très grand pour ce composant (proche de 1) et plus petit pour les autres. Dans certains produits, μ_r peut représenter un pourcentage en termes de masse, etc.

Ainsi, nous représentons la qualité environnementale du produit fini par trois attributs. Le premier attribut, β , correspond au taux de réduction de carbone des activités de transport par rapport à la quantité de carbone émise quand la qualité environnementale des produits n'est pas considéré. Le second attribut, λ , est le taux de réduction des émissions de gaz qui peut être atteint en utilisant un processus de production donné par rapport au niveau d'émission par rapport aux émissions du processus de référence qui peut être le processus le plus utilisé dans le secteur quand la qualité environnementale est ignorée. Le troisième attribut, ψ , est le taux de composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini par rapport au nombre total de composants utilisés. Le choix des processus de production, la sélection des fournisseurs, la localisation des sites et le choix des modes de transport conduisent à déterminer la qualité environnementale du produit fini et, par conséquent, sa demande et son prix de vente. La qualité environnementale globale que nous notons, dans ce qui suit, par G est égale à la somme des ces trois attributs pondérés par des coefficients de sensibilité. Ainsi $G = a_1\beta +$

$a_2\lambda + a_3\psi$ avec a_i les importances respectives des attributs environnementaux. Ces coefficients dépendent généralement de la nature du produit et de l'importance qu'accordent les clients aux différents attributs environnementaux considérés. Par exemple si le produit considéré est de la catégorie agroalimentaire ou cosmétique, une grande importance serait accordée à l'attribut environnemental lié à la composition du produit (ψ), ainsi a_3 serait plus grand que les coefficients a_1 et a_2 .

Une fois avoir déterminé la qualité environnementale du produit fabriqué, une question clé est comment le prix et la demande d'un produit varient-ils en fonction de sa qualité environnementale. Dans la section suivante nous apportons des éléments à cette problématique.

2.2 Modélisation de la demande en fonction de la qualité environnementale des produits

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, les comportements des clients envers la qualité environnementale des produits sont différents. Nous distinguons principalement deux types de clients. La première catégorie regroupe les clients ordinaires qui se basent dans leurs achats sur les critères ordinaires de choix de produit et principalement son prix de vente. Cette catégorie regroupe les clients peu soucieux des questions environnementales et également des clients qui sont conscients des problèmes environnementaux et de l'importance de l'achat des produits verts, mais qui ne mettent pas en cohérence leurs sensibilités environnementales et leurs comportements réels lors de l'achat des produits. Ceci est principalement lié aux prix élevés des produits verts par rapport à leurs équivalents ordinaires (Young et al, 2010). La deuxième catégorie des clients concerne les clients écologiques ou verts. Ces clients accordent une grande importance à la qualité environnementale des produits dans leurs achats. Cette catégorie de clients est prête à payer des surplus pour des produits présentant une bonne qualité environnementale.

Nous considérons une entreprise qui opère dans un marché où la demande de ses produits dépend de leurs performances environnementales. En plus des clients ordinaires qui ne sont pas intéressés par le niveau de la qualité environnementale des produits, nous supposons donc qu'il y en a d'autres qui sont sensibles à cette performance.

Par conséquent, nous supposons qu'il existe une demande de base correspondant à la demande des clients ordinaires. Ensuite, la demande augmente avec l'augmentation du niveau de la performance environnementale du produit. En d'autres termes, si l'entreprise améliore le niveau de la qualité environnementale de ses produits alors elle peut accroître sa part de

marché en attirant plus de clients verts. Selon la stratégie de l'entreprise, deux approches différentes de modélisation de la structure du marché peuvent être considérées : Une stratégie de mass marketing et une stratégie de segmentation du marché.

2.2.1 Stratégie de mass marketing

Dans une première approche, nous supposons que l'entreprise opte pour une stratégie de mass marketing qui consiste à offrir un seul produit pour les différents types de clients. Le prix de vente de ce produit est fixe et unique pour tous les clients (ordinaires et verts). Ce prix est déterminé par les coûts du produit et les prix des produits concurrents et conventionnels qui se trouvent sur le marché. Cette stratégie permet aux entreprises de garder ses clients ordinaires en assurant un prix concurrentiel sur le marché qui n'augmente pas en fonction de la qualité environnementale des produits. Dans ce cas l'amélioration de la qualité environnementale des produits permet à l'entreprise d'améliorer ses profits en attirant des clients qui s'intéressent à la qualité environnementale des produits.

Ainsi la demande de base est un paramètre d'entrée constant noté \bar{D} qui correspond à la demande des clients ordinaires et ne dépend pas de la qualité environnementale du produit. Nous considérons que la demande des clients verts dépend de la qualité environnementale du produit et qu'elle augmente linéairement avec l'augmentation du niveau de la performance environnementale du produit. Nous supposons qu'il s'agit d'une fonction linéaire croissante (h) du niveau de la qualité environnementale. Par conséquent, la demande totale pour le produit fabriqué est la somme de la demande de base des clients ordinaires et la demande des clients verts ($\bar{D} + h(\text{qualité environnementale})$).

Rappelons que le prix de vente du produit est fixé auparavant et ne change pas en fonction du niveau de la qualité environnementale du produit. Dans cette approche la question principale est donc de déterminer quel niveau de qualité environnementale attribuer aux produits fabriqués afin d'augmenter sa part de marché tout en restant sous une contrainte de contrôle des coûts supplémentaires qui peuvent être engendrés pour l'amélioration de la qualité environnementale des produits. Nous allons montrer dans les chapitres suivants que cette décision dépendra du degré de sensibilité du marché (des clients) à la qualité environnementale des produits.

2.2.2 Stratégie de segmentation du marché

Dans la seconde approche, nous considérons que l'entreprise offre une variété différente du produit pour chaque segment du marché : une variété ordinaire pour les clients ordinaires et une variété verte pour les clients écologiques. En effet, dans des situations réelles du monde industriel, plusieurs entreprises offrent des variétés différentes pour un produit fini donné. Par exemple plusieurs entreprises de l'industrie de papier fournissent à leurs clients des papiers issus d'origine recyclée et d'autres d'origine non-recyclée. Nous citons aussi les efforts des constructeurs automobiles pour produire et commercialiser sur le marché des véhicules hybrides et électriques. Plusieurs autres entreprises ont introduit sur le marché, en plus de leur gamme de produits ordinaires, des produits équivalents verts. Nous citons le cas des ordinateurs « verts » de IBM (commercialisés sous le nom de IBM's "GREEN" PS/2 computer (Chen, 2001)).

Dans cette approche, nous supposons que les clients ordinaires achètent un produit quel que soit le niveau de sa qualité environnementale, mais ils sont très sensibles à son prix de vente (Brécard et al, 2009 ; Chen, 2001 ; Mahenc, 2008). Toutefois, les clients verts acceptent de payer plus pour obtenir un produit avec un niveau élevé de qualité environnementale. Le prix de la variété verte du produit est alors modélisé par une variable de décision qui dépend du niveau de sa qualité environnementale.

S'il est justifiable dans le cas de mass marketing de considérer que, lorsque le prix est tenu fixe (non impacté par la qualité environnementale), la demande totale est croissante en fonction de l'augmentation de la qualité environnementale du produit (Krass et al., 2013; Su et al., 2012; Chen, 2001), la modélisation de la segmentation du marché est plus délicate et nécessite une certaine connaissance et maîtrise de notions économiques. Afin de pouvoir présenter une modélisation qui se rapproche des réalités économiques, nous avons été amenés à étudier certaines notions économiques telles que l'élasticité de la demande et le willingness to pay (WTP).

Dans la section suivante nous allons présenter une brève définition de ces notions puis nous exposons la modélisation de la stratégie de segmentation de marché selon notre vision.

2.2.2.1 Notions économiques importantes et hypothèses pour la modélisation de la demande et du prix du produit vert

En économie, finance et marketing, le système de définition de la demande et du prix (appelé pricing ou également la politique de prix) d'un produit est l'un des axes fondamentaux de la recherche. Il s'agit d'un système complexe. En effet ces décisions dépendent de plusieurs facteurs (capacité du marché, coût du produit même, prix des produits concurrents et substituants, préférences des clients, etc.). Ce domaine de recherche reste l'un des plus vastes et des plus complexes (Guyot, 2001). Le but de cette section n'est pas de donner une étude complète des notions économiques liées au système de pricing et de la demande. Nous cherchons plutôt à comprendre certaines notions économiques les plus utilisées dans la littérature portant sur l'étude du comportement des clients envers la qualité environnementale des produits. Dans ce contexte, deux notions économiques s'avèrent particulièrement importantes pour notre travail : prix d'acceptabilité et élasticité de la demande.

La notion de prix d'acceptabilité ou willingness to pay (WTP)

Dans la littérature plusieurs travaux portant sur les déterminants du prix d'un produit existent. Les premières études considèrent que généralement le prix est lié à son coût, sa demande et aux prix des produits substituants (Nwokoye, 1975 ; Mahajan, 1982; Morton et Devine, 1987). Venkataraman (1981) est parmi les premiers auteurs à avoir lié le prix des produits à leurs qualités. Un autre déterminant important du prix du produit est la préférence clients appelée également dans la littérature « utilité des clients ». Cette notion (utilité client) décrit l'importance qu'apportent les clients finaux à certains attributs du produit fini. Pour quantifier cette utilité client, la théorie du consommateur en microéconomie relie cette notion au concept du « prix d'acceptabilité », appelé également « disposition à payer » ou « prix psychologique », en anglais « willingness to pay ». Elle désigne la façon dont un consommateur donné estime l'ordre de grandeur de prix qu'il est prêt à payer pour acquérir et consommer un bien ou un service donné. La différence entre le prix effectivement payé et le « prix d'acceptabilité » forme le surplus du consommateur.

Cette notion de WTP est considérée comme la clé pour comprendre comment l'attitude des clients envers des produits différenciés et des caractéristiques différentes se transforme en valeur monétaire. Pour étudier les attributs des produits et les caractéristiques de consommation qui peuvent influencer les différents niveaux de la « disposition à payer » des clients, des méthodes d'évaluation contingente (Gil et al., 2000), des méthodes d'analyse en

régression (Roe et al., 2001; Banzhaf, 2004; Olesen et al., 2010) ainsi que des méthodes d'analyse conjointe ont été appliquées (Lin et al., 1996; Loureiro et Lotade, 2005).

Pour introduire un nouveau produit sur le marché, des études sont menées afin de déterminer le montant maximal qu'une personne serait prête à payer pour obtenir un produit avec une qualité donnée ou pour éviter une caractéristique non désirée dans le produit.

Cette notion est utilisée dans la littérature afin de déterminer le comportement monétaire des clients envers les produits verts et afin de calculer le prix accordé par le client à la qualité environnementale des produits. En effet, les consommateurs peuvent explicitement exprimer leurs préoccupations en achetant des produits différenciés qui leur assurent un niveau minimum de qualité environnementale. Ce comportement est généralement accompagné par une « disposition à payer » un prix supplémentaire pour ce type de produit (European Commission, 1997; Gil et al., 2000; Loureiro et Lotade, 2005; Govindasamy et al., 2005).

Relation entre la demande d'un produit et son prix de vente

L'élasticité de la demande est utilisée par les économistes pour déterminer la sensibilité des consommateurs à des changements de prix. L'élasticité-prix est le rapport entre la variation relative de la demande d'un produit et la variation relative du prix de ce produit. La variable autonome est le prix et la variable induite est la quantité demandée. Cette élasticité est déterminée en considérant, le revenu du consommateur et les prix des autres produits concurrents ou substituants constants. Ce rapport est généralement négatif car lorsque le prix augmente, la quantité demandée diminue et réciproquement. La courbe de demande ⁽²⁾ dans ce cas répond à une fonction décroissante monotone ⁽³⁾ (figure 2.1 avec q = demande, p = Prix).

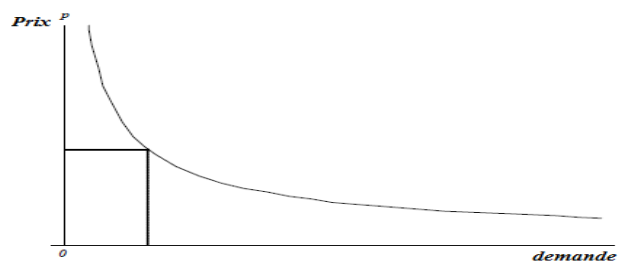


Figure 2.1. Courbe typique de l'élasticité prix demande (Guyot, 2001 *Eléments de microéconomie*. Edition technip, 37)

⁽²⁾ On appelle courbe de demande : la quantité demandée d'un bien en fonction de la seule variation du prix de ce bien.

⁽³⁾ Il est à noter que par convention, ou par tradition dans la présentation des courbes de la demande en économie, le prix est présenté sur l'axe des ordonnées bien qu'il soit la variable dont on regarde l'influence. La présentation mathématique habituelle eût voulu que la variable indépendante soit portée sur l'axe des abscisses.

L'élasticité-prix peut également être positive. Dans ce cas, la demande varie dans le même sens que le prix : une augmentation des prix fait croître la demande. L'élasticité de la demande est positive et la courbe de demande dans ce cas est croissante. On parle dans ce cas de courbe de **demande atypique**. Cette situation se rencontre, lorsque l'effet de Giffen ou l'effet Veblen s'appliquent.

L'effet Giffen (d'après Robert Giffen) se manifeste pour les produits de première nécessité (exemple : le pain) ; lorsque le prix de ces produits augmente, la demande paradoxalement s'accroît. La hausse des prix des produits de première nécessité entraîne une baisse de pouvoir d'achat des consommateurs. Ceux-ci sont donc forcés pour équilibrer leur budget, à renoncer à d'autres biens de substitution (ou de luxe : le brioche, par exemple) plus coûteux pour accroître leur demande en produits indispensables.

L'effet Veblen (d'après Thorstein Veblen) appelé également paradoxe de Veblen : la demande d'un bien augmente en même temps que son prix (élasticité prix positive). Ce phénomène s'explique par un facteur psychologique lié au signe social que constitue l'achat d'un bien au prix élevé. Lorsqu'il n'est « pas assez cher » (c'est-à-dire que son prix ne reflète pas son positionnement particulier) sa demande reste faible. Cette situation paradoxale s'explique par le fait qu'un prix bas renvoie une image de qualité perçue inférieure, et/ou ne permet plus au produit d'être un symbole de statut. Par contre, lorsque son prix augmente, sa demande augmente aussi. Cette réaction positive de la demande à la hausse des prix est connue sous le nom « effet Veblen ». Il s'agit d'une forme anormale de la courbe de demande. Dans ce cas la pente de la courbe de demande est positive. C'est ce qu'on appelle une courbe de demande atypique.

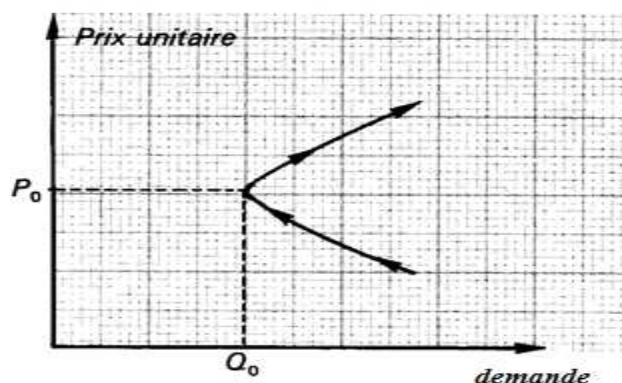


Figure 2.2. Courbe atypique de l'élasticité prix demande (F. Guyot. *Eléments de microéconomie*. Edition technip, 57)

Ce phénomène d'élasticité positive est rencontré dans les travaux portant sur l'étude comportementale des clients envers les produits verts.

Plusieurs travaux dans la littérature ont présenté des modèles d'analyse de régression permettant d'étudier les caractéristiques de l'élasticité de la demande et la volonté des clients pour payer une prime supplémentaire pour l'acquisition des produits verts (Mewton et Cacho , 2010 ; Weil et McMahon, 2003 ; David et al., 2010). Ces travaux touchent à des secteurs différents. Ubilava et al., (2010) et Brécard et al. (2010) étudient le WTP des différents clients pour l'achat des produits alimentaires verts. Dans ces deux travaux, les auteurs distinguent entre le produit alimentaire bio et produits alimentaires verts. Rappelons qu'un produit bio n'est pas bien sûr forcément vert. Ces études montrent que l'attitude des clients diffère selon leurs classes socio économiques. En effet ces deux travaux montrent que les classes aisées de la société présentent plus de volonté pour acheter les produits verts. Pour Brécard et al. (2010) cette classe présente une élasticité de demande positive pour des prix cinq fois plus chers pour les poissons verts. Ubilava et al. (2010) confirment également cette élasticité positive pour la classe aisée de la société.

Hypothèses de modélisation de la demande et du prix des produits verts

Plusieurs travaux dans la littérature (Brécard et al., 2009 ; Mahenc, 2008 ; Young et al., 2010) annoncent qu'un prix élevé est un indicateur sur la qualité environnementale du produit. Les entreprises se basent sur le prix du produit pour valoriser l'image environnementale de leurs produits. Les clients « verts » considèrent que le prix élevé est une garantie de qualité environnementale. Pour des raisons psychologiques, des facteurs moraux et sociétaux, les clients paient pour des produits verts qui sont plus chers que ceux ordinaires. Ce comportement peut être signe de distinction dans la société. A travers leurs achats verts, les clients veulent faire preuve de leur conscience envers l'environnement (Young et al., 2010). D'autres clients le font par une vraie conviction. Différentes sont donc les raisons qui poussent certains clients vers l'acquisition des produits verts malgré leurs prix élevés. Ce qui est important à retenir est que les clients finaux perçoivent de la valeur dans la qualité environnementale des produits. Ce qui implique que la demande des produits verts peut croître même si leurs prix augmentent.

2.2.2.2 Modélisation proposée

Nous présentons dans cette partie la modélisation du cas de segmentation du marché. Nous considérons que la demande et le prix du produit offert pour le segment ordinaire sont des paramètres constants. Nous les notons respectivement D^o et S^o . Par contre, la demande et le prix du produit offert au segment vert dépendent du niveau de la qualité environnementale du produit. Si le niveau de la qualité environnementale du produit offert au segment vert est égal au niveau minimum de la qualité environnementale acceptée par les clients du segment vert (noté G_u), alors le produit est considéré comme un produit ordinaire. Dans ce cas, le produit offert aux clients du segment vert est vendu au même prix que le produit offert au segment ordinaire (S^o) et sa demande est nulle puisque les clients du segment vert ne seront pas intéressés par ce produit. La demande et le prix du produit offert au segment vert augmentent linéairement avec l'augmentation du niveau de sa qualité environnementale. La demande et le prix du produit offert au segment vert sont limités par des bornes supérieures qui sont respectivement égales à D_{max}^g et S_{max}^g .

La figure 2.3 résume notre système de modélisation pour la segmentation du marché.

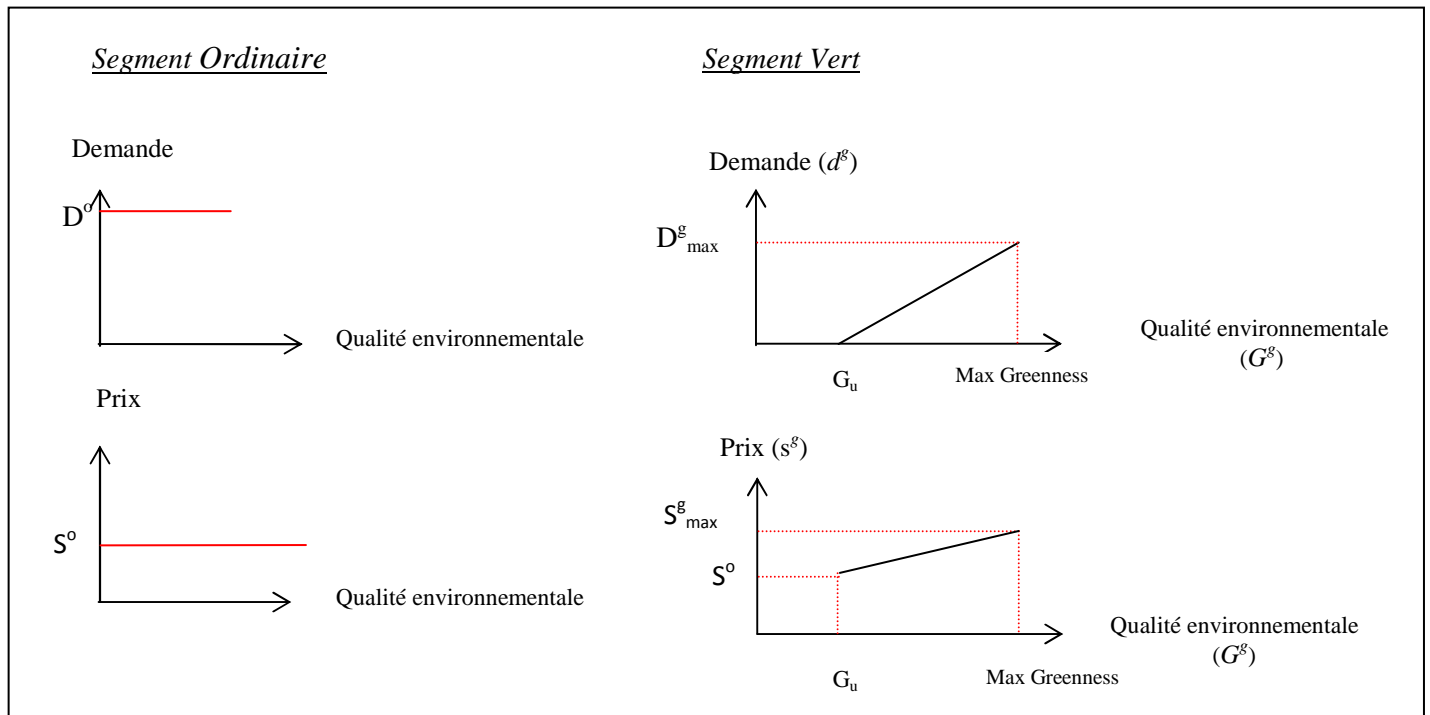


Figure 2.3. Modélisation de la demande et du prix pour la stratégie de segmentation du marché.

Soit G^g , le niveau de la qualité environnementale du produit offert pour le segment vert et G^o le niveau de la qualité environnementale du produit ordinaire. Le niveau de la qualité

environnementale de chacune des variétés de produit sont des variables de décision du système qui sont définies comme étant la somme des attributs environnementaux considérés (β, λ, ψ) , ce niveau de qualité environnementale varie entre 0 et un niveau maximum de la qualité environnementale que nous notons « Max Greenness ». Dans les équations suivantes, nous exprimons la variation de la demande (d^g) et le prix (s^g) du produit offert au segment vert.

$$d^g = \frac{D_{max}^g}{Max\ Greenness - G_u} * G^g - \frac{D_{max}^g G_u}{Max\ Greenness - G_u}$$

$$s^g = \frac{S_{max}^g - S^o}{Max\ Greenness - G_u} * G^g + \frac{Max\ Greenness * S^o - S_{max}^g G_u}{Max\ Greenness - G_u}$$

La contrainte suivante garantit que le niveau de qualité environnementale du produit offert au segment vert soit supérieur au niveau minimum exigé par les clients verts : $G^g \geq G_u$.

La contrainte ($G^o \leq G^g$) garantit que le niveau de la qualité environnementale du produit offert au segment vert soit supérieure ou égale au niveau de la qualité environnementale du produit offert au segment ordinaire. Sinon dans le cas contraire, les clients verts achèteraient le produit ordinaire.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord présenté la modélisation de la qualité environnementale des produits en fonction des décisions de conception de la chaîne logistique. Pour ce faire, selon les impacts environnementaux des décisions de la chaîne logistique nous avons défini trois attributs différents qui mesurent la qualité environnementale des produits.

Puis nous avons modélisé la demande et le prix en fonction de cette qualité environnementale. Nous avons montré que deux approches différentes sont envisageables pour les entreprises. Nous avons présenté une modélisation correspondant à chacune de ces deux stratégies.

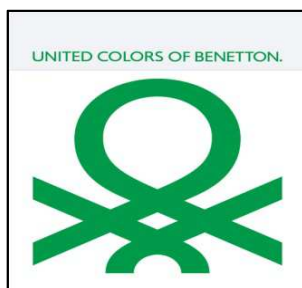
Chapitre III : Présentation d'un cas d'étude dans la filière textile

Introduction

Le présent chapitre est dédié à la description d'un cas réel d'une entreprise confrontée aux problèmes environnementaux et à un marché où la clientèle s'intéresse à la qualité environnementale des produits. Notre cas d'étude concerne le secteur de textile. Ce cas est tout d'abord intéressant car l'empreinte écologique des produits textiles est assez importante : chaque étape de leur cycle de vie (culture des fibres, ennoblement, confection, distribution, entretien, fin de vie) soulève des enjeux environnementaux considérables. Selon des études statistiques, l'utilisation massive d'intrants chimiques nocifs et dangereux pour l'environnement fait du secteur textile l'objet de scandales réguliers. De plus le secteur textile est parmi les premiers secteurs à avoir mis des produits écologiques sur le marché. Au départ, plusieurs industriels du secteur ont profité de l'étiquette bio pour donner aux clients l'image de produit " vert " à la mode. Mais avec la conscience croissante des clients, les produits verts ne sont plus des phénomènes à la mode mais des signes d'une vraie sensibilité environnementale. Ces clients, aujourd'hui, distinguent entre produits « bio » et produits verts (ou écologiques). Les industriels du secteur doivent ainsi repenser la conception de leurs chaînes logistiques et son impact sur la qualité environnementale des produits.

Nous nous intéressons en particulier à la compagnie multinationale Benetton qui a une filiale en Tunisie. Ce cas sert tout d'abord à illustrer la mise en œuvre de la démarche de modélisation de la structure du marché présentée dans le chapitre précédent et surtout à illustrer l'impact des décisions logistiques (choix des procédés de production, localisation des sites, sélection des moyens de transport et des fournisseurs) sur la qualité environnementale des produits. Nous l'utiliserons pour tester et expérimenter les modèles mathématiques développés dans le cadre de ce travail.

3.1 Présentation du groupe Benetton



Benetton est une compagnie fondée en 1965, en Italie, par une fratrie : la famille Benetton. Initialement son activité consistait en la sous-traitance de fabrication pour d'autres marques. En 1968, la première usine est inaugurée. Trois ans plus tard la société a ouvert ses trois premiers magasins. Un an plus tard, elle a fait son premier pas dans la mondialisation en ouvrant son premier magasin hors d'Italie. En 1977, l'entreprise réalise 2 % de son chiffre d'affaires sur des marchés extérieurs à l'Italie. En 1986, ce chiffre est passé à 61 %, dont 40 % du chiffre d'affaires est réalisé dans des pays européens (hors Italie) et 15 % en Amérique du Nord.

Aujourd'hui, le groupe est développé dans l'industrie du prêt-à-porter sous la marque "United Colors of Benetton", distribuée actuellement dans 120 pays. Le groupe produit plus de 150 millions de produits d'habillement par an, possède plus de 6200 magasins dans le monde et effectue un chiffre d'affaires de plus de 2 milliards d'Euros. Suite à une analyse récente de la performance globale des entreprises européennes, Benetton est classé aujourd'hui au troisième rang après Glaxo et Reuters Holdings.

Benetton est présent aujourd'hui dans un secteur hautement compétitif caractérisé par une clientèle exigeant une grande variété de produits. Le marché est volatil, le rythme de la mode est très rapide et le cycle de vie des produits doit être court afin de maintenir l'intérêt des clients. En fait, en plus des deux collections de saison de base de la mode (collections hiver et été) Benetton commercialise chaque année huit autres collections, ce qui implique un changement complet de lignes de produits dix fois par an. En plus de la diversification de l'offre, l'entreprise affronte la concurrence en se basant sur un agenda social qui permet de vendre une image de marque d'une entreprise proche des problèmes sociaux de ses clients. A travers ses campagnes publicitaires Benetton aborde les problématiques liées au SIDA, au racisme et aux problèmes environnementaux.

Dans la section suivante nous présentons le cycle de vie des produits textiles et les enjeux environnementaux. Ensuite, nous passons à la présentation des stratégies environnementales du groupe Benetton.

3.2 Produits textiles : cycle de vie et enjeux environnementaux

Dans l'industrie de textile, on distingue principalement six étapes importantes (récolte de la fibre, filature, tissage, ennoblement, teinture, confection). A chaque étape correspondent des enjeux et des défis environnementaux différents que nous décrivons en détail dans la suite.



Figure 3.1. Principales étapes du secteur textile

1- Récolte de la fibre

Les fibres utilisées dans le secteur de textile sont nombreuses et répondent à des propriétés techniques différentes. Mais ces dernières peuvent être classées en deux catégories principales à savoir la fibre naturelle et la fibre chimique. **Les fibres naturelles** proviennent du règne végétal, animal et minéral. **Les fibres chimiques** sont fabriquées industriellement. Elles sont divisées en deux groupes : les fibres artificielles (obtenues à partir des substances naturelles végétales, animales et minérales : cellulose, protéines, verre) et les fibres synthétiques (issues de substances synthétiques qui ne se trouvent pas à l'état naturel : la matière de base est composé des produits pétroliers, de l'huile de ricin (Rilsan), etc.). La figure 3.2 donne un panorama sur les différentes fibres. Que ce soit naturelle ou chimique aucune n'est exempte de bonnes pratiques environnementales.

Contrairement à ce que nous pouvons penser intuitivement, la fibre naturelle peut également avoir une empreinte environnementale négative. En effet l'empreinte environnementale dépend des pratiques de la culture de cette fibre naturelle.

Considérons comme exemple le coton qui est la fibre naturelle la plus utilisée dans le secteur textile. Selon les pratiques de récolte de cette fibre, l'impact de la phase de production d'un t-shirt à base de coton « irrigué ⁴ » représente 73% de l'impact environnemental total lié à ce t-shirt, contre 17% pour du coton « non irrigué ». La culture du coton génère une pollution des sols, de l'eau et de l'air. Les cultures de coton utilisent 25% des pesticides vendus dans le

⁴ L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau au coton pour augmenter la production.

monde et consomme 2,6% de la consommation mondiale d'eau (Coton World supply use and trade ; Foreign Agricultural Service ; mars 2009).

Dans le secteur textile, il ne suffit donc pas de choisir la matière première naturelle car même cette dernière peut avoir un impact négatif sur l'environnement. Dans cette partie, nous avons illustré un seul type de fibre naturelle. Si la fibre naturelle n'est pas sans empreinte environnementale, que pourrait être alors celle des fibres chimiques dont la majorité est issue du pétrole. Dans ce qui suit, nous décrivons les fibres chimiques les plus utilisées dans le secteur textile.

Les fibres chimiques les plus utilisées dans le secteur textile sont le polyester et l'acrylique.

Le polyester : obtenu à partir du pétrole brut raffiné en passant par plusieurs étapes et réactions chimiques (acides, glycol, etc.). Généralement, pour produire 1 kg de polyester, on utilise 1,5 kg de pétrole. Le polyester est la fibre synthétique la plus produite dans le monde. Elle représente 70% des fibres synthétiques utilisées dans le secteur textile. L'Asie est le premier producteur de polyester suivi de l'Europe.

L'acrylique : La production d'acrylique implique l'utilisation de solvants, de pétrole et de plusieurs produits chimiques. La fibre acrylique est particulièrement problématique lors de sa combustion qui entraîne le dégagement de gaz toxique (cyanure).

L'Asie est le premier producteur des fibres chimiques suivi de l'Europe (Coton World supply use and trade ; Foreign Agricultural Service ; mars 2009). Les entreprises du domaine textile qui se soucient de l'impact environnemental de leurs produits textiles peuvent s'approvisionner auprès des producteurs européens qui sont soumis à des réglementations environnementales plus strictes. Toutefois, le marché européen reste plus cher que son concurrent asiatique.

FIBRES NATURELLES	ORGANIQUES	VEGETALES	Coton Lin Chanvre Kapok Bananier Cyprès Sisal
		ANIMALES	Laine Cashmere Soie
FIBRES CHIMIQUES	SYNTHETIQUES	ISSUES DE RESSOURCES FOSSILES	Polyester Polyamide Acrylique Élasthane
		ISSUES DE LA BIOMASSE	Acide Polylactique (maïs)
	ARTIFICIELLES	CELLULOSIQUES	Viscose Lyocel Modal Carapace (crabe)
		PROTEINIQUES	Caséine (lait) Soja

Figure 3.2. Panorama des fibres textiles (Environmental Health and Safety guidelines for textile manufacturing, avril 2007)

Choisir de la matière première (fibre) naturelle issue d'agriculture biologique ou d'agriculture normale utilisant les pesticides, privilégier une fibre synthétique recyclée ou non, ces décisions s'avèrent d'une extrême importance pour réduire l'impact environnemental des produits textiles.

2- Filature

Il s'agit du processus de transformation de la fibre en bobines de fils. Les procédés de filature associés aux différentes familles de fibres et les enjeux environnementaux qui s'y attachent sont spécifiques à chacune d'elles.



Pour les fibres naturelles (végétales ou animales)

De nombreuses étapes successives (principalement des procédés mécaniques) sont nécessaires pour passer de la fibre brute à la bobine de fil. Traditionnellement, on distingue la filature des fibres courtes (du type coton) de celle des fibres longues (de type laine). Au préalable, les fibres brutes doivent être nettoyées en profondeur. Dans le cas de fibres naturelles, il s'agit des résidus d'engrais et de pesticides. Pour les fibres animales, on cherche à éliminer les graisses et les différentes substances antiparasitaires utilisées lors de l'élevage des animaux. Ainsi, la dangerosité potentielle des résidus pour l'environnement est très dépendante de la manière dont auront été produites les fibres naturelles. Cette étape de nettoyage préalable peut donc être particulièrement polluante et consomme beaucoup d'eau.

Fibres synthétiques (chimique ou artificielle) :

Issues de la transformation des dérivés de pétrole, le filage de ces fibres nécessite l'utilisation de quantité importante de solvants, ce qui est susceptible de générer une grande concentration de composés organiques volatiles (COV) dans l'air.

En fonction du type de la fibre chimique, trois principales techniques sont disponibles :

- Le filage par fusion : le polymère en fusion est poussé dans une extrudeuse puis refroidi par jet d'air pour obtenir les filaments (polyester, polyamide, etc.)
- Le filage à sec : le polymère est fondu dans un solvant avant d'être poussé dans une extrudeuse. Les filaments sont formés après évaporation des solvants produisant de fortes émissions de COV⁵.
- Le filage au mouillé : le polymère est dissout dans une solution, poussé dans une extrudeuse puis déversé dans un bain de solvants.

Des huiles minérales sont ensuite nécessaires pour le bobinage des fils. Ces agents peuvent contenir des traces d'hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP), très dangereux pour la santé et l'environnement. Les résidus de ces huiles sont susceptibles de se retrouver dans les eaux usées et les rejets gazeux des sites d'ennoblissement.

Les procédés de filature associés aux différentes familles de fibres et les enjeux environnementaux qui s'y attachent sont spécifiques à chacune d'elles. Dans tous les cas, pour limiter la pollution de l'eau, les agents de préparation et d'autres additifs de filature devront être biodégradables à hauteur minimum de 90%.

3- Tissage :

⁵ COV : Corps Organiques Volatiles



Le tissage est la technique la plus répandue pour la fabrication des étoffes. Elle consiste à entrecroiser perpendiculairement une chaîne (dans le sens de la longueur) et une trame (dans le sens de la largeur) par vagues successives afin de constituer un tissu. Lors du tissage, les fils sont soumis à de très fortes contraintes mécaniques. Pour les protéger et les lubrifier, des agents d'encollage enrobent les fils avant le passage sur le métier à tisser. Ces agents seront éliminés des étoffes lors du désencollage et devront également être éliminés des eaux résiduelles. Parmi les substances utilisées, on trouve des agents d'origine naturelle (amidon, celluloses, protéines, etc.) et des substances synthétiques (polyvinylyles, polyacrylate, polyester). Les agents organiques sont à privilégier pour leur plus grande biodégradabilité. Certains agents d'encollage sont recyclables et surtout réutilisables dans le même processus (réutilisation possible uniquement sur les sites où le tissage et le désencollage sont intégrés).

4- Ennoblement :

Cette étape regroupe les étapes préliminaires de désencollage, de dégraissage et de blanchiment.

- Le désencollage : consiste à éliminer les agents d'encollage appliqués sur les fils de la chaîne lors du tissage. Les techniques diffèrent en fonction de la nature du support et des substances utilisées. Les agents d'encollage à base d'amidon sont éliminés par action

enzymatique. On utilise des agents de lavage et du carbonate de sodium pour les encollages synthétiques.

- Le dégraissage et lavage : le dégraissage permet d'éliminer les substances présentes sur les fibres. Il peut être combiné à d'autres étapes de prétraitement. En fonction des substances présentes sur la fibre, le dégraissage peut se faire en base aqueuse ou solvantée très émettrice de COV. Il convient ensuite de nettoyer les fibres avec des détergents biodégradables en base aqueuse et de coupler le procédé avec un système adapté de traitement des effluents. Concernant les fibres synthétiques, les lubrifiants utilisés, encore présents sur les fibres, risquent d'entraîner des émissions atmosphériques fortement polluées lors des étapes ultérieures de thermo fixation. C'est pourquoi, lorsque cela est techniquement possible, il est préférable de laver les fibres synthétiques avant la fixation thermique. Dans le cas inverse, il conviendra d'éliminer avec soin les importantes vapeurs de COV générées.
- Le blanchiment : Le blanchiment permet de blanchir les étoffes avant leur teinture, en éliminant les pigments existants sur les fibres. De nombreux agents de blanchiment peuvent être utilisés, certains sont à base de composés halogénés comme l'hypochlorite de sodium, par exemple. C'est pourquoi le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) doit être systématiquement privilégié et les agents peu biodégradables (EDTA, DTPA, etc.) éliminés au maximum.

Lors du procédé d'ennoblissement, les procédés et techniques appliquées à l'étoffe du textile dépendent des propriétés recherchées. L'imperméabilisation, l'ignifugation, les traitements de résistance au froissage, au feutrage, au rétrécissement, (etc.) sont des étapes possibles de l'ennoblissement. Nous présentons dans ce qui suit quelques procédés d'ennoblissements.

- L'ignifugation : consiste à appliquer un retardateur de flamme sur les étoffes. Les agents ignifugeants sont particulièrement réactifs et peu biodégradables. Dans la mesure du possible, le mieux est encore de limiter leur quantité au strict nécessaire.
- L'enduction : consiste à appliquer une pâte d'enduction sur toute la surface d'une étoffe. Elle lui confère ainsi des propriétés imperméabilisantes tout en renforçant sa résistance mécanique. L'enduction est plus particulièrement utilisée dans le domaine des vêtements techniques (sport outdoor par exemple). La pâte d'enduction appliquée (polychlorure de vinyle, polyuréthane, silicone, acrylique, etc.) est ensuite définitivement associée sur l'étoffe par une fixation thermique (passage dans un four) provoquant l'émission dans l'air de produits dangereux pour la santé.

- Le sablage : Ce procédé est principalement utilisé dans l'industrie du jean, la finalité est de conférer un aspect usagé à la toile (denim). Le sablage manuel consiste à pulvériser du sable à haute pression à l'aide de canons. L'opération libère des particules de silice cristalline dont l'inhalation provoque une infection pulmonaire incurable et mortelle (la silicose). C'est pourquoi elle est interdite ou strictement réglementée dans plusieurs pays. Le sablage continue toutefois à être pratiqué couramment en Egypte, Jordanie, Syrie, Inde, Chine, Indonésie, au Bangladesh, au Mexique, au Cambodge ou au Pakistan. Cette pratique devrait être abandonnée au profit des techniques de substitution telles que le brossage.

5- Teinture :

Il existe presque autant de procédés de teinture que de colorants et de mélanges de fibres imaginables. Le principe de la teinture repose sur la coloration d'une étoffe via l'absorption, la diffusion puis la migration du colorant au sein des fibres qui la composent. Au-delà du choix des colorants, le bain de teinture nécessite également un certain nombre de produits auxiliaires (véhiculeurs, dispersants, sels, fixateurs, etc.).

Pour le choix de la teinture, on distingue principalement deux types : la teinture naturelle et celle chimique. La teinture naturelle est basée sur l'utilisation de plantes ou de champignons pour extraire des pigments servant à teindre les textiles. L'utilisation de la teinture naturelle constitue un domaine de savoirs traditionnels. A partir du 21^e siècle, les procédés de teinture naturelle ont décliné progressivement face à l'essor de la chimie organique et au développement des colorants synthétiques. Vu leurs coûts élevés par rapport à la teinture chimique, une part minime des textiles utilisent aujourd'hui la teinture naturelle y compris les produits dits éco-conçus. De nombreuses activités tendent à relancer la production de ces extraits de colorants et de pigments.

On distingue principalement deux procédés de teinture, la teinture en discontinu (pouvant être réalisés sur les fibres, les fils et les étoffes) et la teinture en continu (uniquement pour les étoffes). Le choix entre ces deux techniques dépendra du type d'article textile, du type de colorant, du matériel disponible, de la taille des lots traités et des coûts engendrés. Elles comportent différentes étapes telles que la préparation du colorant et de la teinture du support, la fixation du colorant sur le support, le nettoyage de la cuve et ensuite le séchage du produit fini ou semi fini.

Après chaque cycle de teinture, des quantités d'eau impressionnantes sont utilisées pour rincer les étoffes des nombreux résidus encore présents sur les fibres. A chaque nouvelle solution de

coloration, c'est l'intégralité des cuves et du système de tuyauterie qui devront être rincés à grandes eaux. La simple configuration du système de rinçage avec réutilisation d'eau (appelé également système de rinçage à contre-courant) permet d'économiser 20% d'eau à chaque cycle, des centaines de milliers de mètres cubes peuvent ainsi être préservés chaque année.

6- La confection :

La confection consiste à assembler les différentes pièces pour constituer des vêtements de prêt-à-porter.

Les enjeux environnementaux propres à l'étape de confection concernent la qualité de l'air (génération des émissions polluantes), la consommation d'électricité (due aux équipements), ainsi que la production de déchets solides (chutes de découpe).

Afin d'adresser au mieux ces différents aspects, il est recommandé de mettre en place un système de management QSHE (Qualité, Sécurité, Hygiène, Environnement). A ce titre les certifications ISO 14001 ou EMAS (environnement) et OHSAS (santé et sécurité des travailleurs) constituent d'excellents référentiels internationaux pour l'adoption d'un système de management efficace.

3.3 Stratégies environnementales de Benetton

La société Benetton se penche sur la question environnementale en opérant sur trois axes : la commercialisation sur le marché d'une ligne de produits respectant l'environnement, les campagnes publicitaires qui commercialisent l'image d'une entreprise responsable et consciente des problèmes environnementaux et l'implication dans les manifestations mondiales liées aux problèmes de l'environnement.



À l'encontre de plusieurs autres entreprises qui commercialisent des produits issus de matière première naturelle, comme étant des produits verts, Benetton fait la différence entre produits issus de matière première biologique et les produits verts. « Quoi de plus naturel en apparence qu'un tee-shirt en coton ? Et pourtant, pour le fabriquer, il faut commencer par cultiver la matière première. Le coton est grand consommateur d'engrais et de pesticides, substances chimiques qui polluent et appauvrissent le sol. Vient ensuite l'étape de la teinture, chargée en produits chimiques et métaux lourds, très nocifs pour l'environnement. Puis celle de la confection. Les bandes de coton sont assemblées en usine pour devenir un tee-shirt. Rejets d'eaux usées, pollution de l'air et dépenses énergétiques sont autant de nuisances développées par l'industrie textile ». Tel était les propos du directeur de la filiale Benetton en Tunisie.

En effet, à côté de sa gamme ordinaire de vêtements, Benetton commercialise chaque saison une ligne de vêtements conçus et fabriqués dans le respect de l'environnement. Depuis le choix de la matière première jusqu'à la distribution, à chacune des différentes étapes du cycle de vie de ces produits, des technologies et des choix logistiques qui minimisent l'impact environnemental sont mis en place. Pour sa première expérience avec les vêtements écologiques, Benetton a lancé une ligne de vêtements « écologiques » pour enfant. Cette première ligne de vêtements écologiques a été commercialisée principalement en Allemagne. Cette expérience a connu un succès auprès de la clientèle et les responsables de vente Benetton soulignent que ces articles ont été rapidement vendus malgré leurs prix relativement chers. Aujourd'hui, pour satisfaire les attentes d'une catégorie plus large de sa clientèle, Benetton propose une variété d'articles conçus, confectionnés et distribués en respectant l'environnement pour les différents types de clientèle (hommes, femmes et enfants). Dans ce qui suit, nous présentons certains choix technologiques et logistiques mis en place par l'entreprise dans sa démarche de textiles écologiques.

3.3.1 Fibres naturelles et écologiques

Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, contrairement à ce que nous pouvons croire, une fibre d'origine naturelle n'est pas forcément une fibre écologique. L'élevage des moutons et la récolte du coton naturel peuvent être la source d'émissions importantes de GES suite à l'usage abusif des pesticides et des produits chimiques.

Pour la collection écologique en laine, la fibre utilisée est issue d'un élevage biologique de moutons dans une vallée en Patagonie en Argentine, une région connue par la qualité et la productivité de ses moutons en laine. Il s'agit ainsi d'une fibre naturelle et écologique.

Dans les collections Benetton pour enfants, le coton biologique représente déjà plus de 30% de tous les vêtements en coton, et dans la collection printemps-été 2012, les vêtements en coton bio ont atteint un total de 13 millions d'articles. Ces produits sont tous certifiés selon GOTS (Global Organic Textile Standard), un label qui garantit le respect de principales normes organiques et environnementales, dans la production de fibres.

3.3.2 Innovation des processus et recherche des Technologies alternatives

Consciente du fait que 17 à 20 % de la pollution industrielle provient de la coloration du textile, que 62% des produits chimiques les plus toxiques qui se trouvent dans les eaux proviennent uniquement de la teinture des textiles, Benetton fournit des efforts importants afin de réduire l'impact du processus de teinture sur l'environnement. L'entreprise a commencé en commercialisant des manteaux sans teinture pour les femmes. Mais Benetton ne fut pas la première à opter pour cette idée. En effet la marque Merrell a proposé également la collection de vestes Merrell's NADA (Not Any Dye Applied). Chaque manteau pour femme de petite taille, représente une réduction de 1.6 kg de CO₂, 115.2 litres d'eau, 0.18 kg de produits chimiques et 2.47 kWh d'énergie.

Cette initiative a eu de bons résultats environnementaux et l'idée a attiré un grand nombre de clients. Elle n'était qu'une tentative qui a permis de tester l'intérêt des clients pour les produits verts. Benetton devait innover dans le processus de fabrication pour tirer profit de la clientèle cherchant des produits de bonne qualité environnementale. A travers des réadaptations et des modifications des systèmes de production, Benetton essaie de minimiser l'impact environnemental de son activité et d'innover afin de mettre sur le marché des produits de bonne qualité environnementale. Dans la recherche des technologies alternatives, l'entreprise met en place la technologie AirDye que nous décrivons ci-dessous.

La technologie AirDye (Colorep)

Le principe de cette technologie AirDye est de remplacer l'eau par l'air dans le processus de la teinture. Cette technologie consiste à chauffer le tissu, puis injecter directement le colorant dans les fibres sous la forme d'un gaz. Comparé aux technologies ordinaires, ce procédé permet d'obtenir la même qualité de teinture en minimisant l'utilisation d'eau et d'énergie. La

figure 3.3 présente un diagramme de comparaison entre les technologies ordinaires et celle de AirDye en termes de consommation d'eau, d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre (GES). En effet, comparé aux technologies ordinaires, AirDye permet en général de réduire de 95% la consommation d'eau, 84% les émissions de gaz à effet de serre et d'économiser 87% d'énergie consommée. Tous ces bienfaits pour l'environnement, n'impactent pas la qualité du produit fini car ce dernier présente une meilleure résistance de la couleur (10% contre 1% pour les technologies ordinaires).

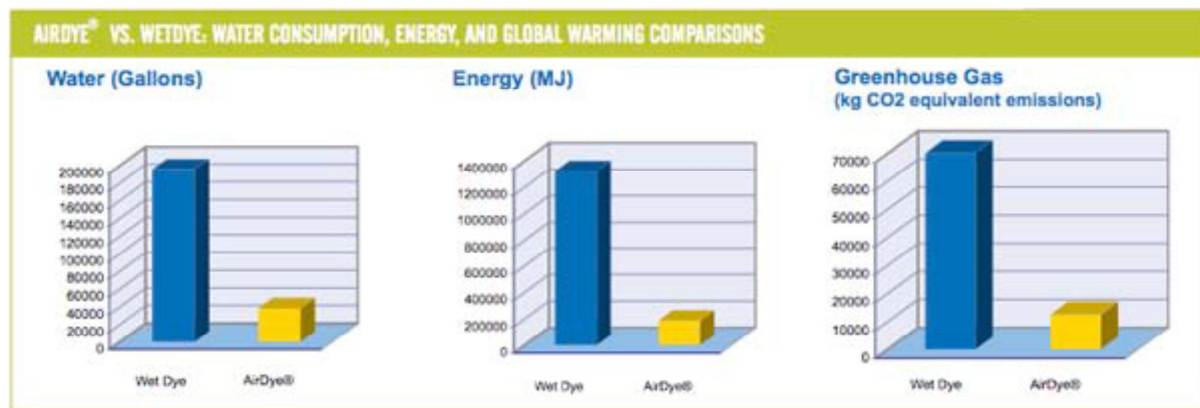


Figure 3.3. AirDye comparé au procédé ordinaire (25000 t-shirts de taille moyenne)

Dans ce qui a précédé nous avons essayé de donner une idée sur les technologies alternatives pour le procédé de teinture. L'innovation et la recherche des procédés alternatifs, concerne également les procédés de confection. En effet il existe plusieurs technologies de confection qui diffèrent par le type d'énergie consommée (électrique ou gaz) et en termes des émissions dégagées.

3.4 Détails de l'étude de cas

Notre exemple numérique est inspiré du cas de Benetton. Toutefois, nous nous sommes basées sur la littérature pour compléter certaines données.

3.4.1 Produit et nomenclature

L'industrie de textile est caractérisée par la diversification des produits fabriqués. Une collection contient au minimum six produits différents. Si la société est spécialisée dans les vêtements pour hommes, femmes et enfants tels le cas de Benetton, il faudrait compter une

vingtaine de produits chaque saison. Pour simplifier l'étude de cas, nous considérons un seul produit qui est une jacket pour femme de taille moyenne.

Les produits textiles sont caractérisés par une nomenclature simple. En général un article est composé essentiellement de la fibre qui sera transformée en tissu, des colorants, de l'ensemble des produits de mercerie qui sont utilisés pour la finition et la décoration du produit (boutons, fermeture, etc.). Ce produit est fabriqué, dans le cas de segmentation du marché, en deux variantes différentes. La première est considérée comme la variante ordinaire et la deuxième est la variante verte.

Pour la jacket en question, le tableau 3.1 résume l'ensemble des composants. Chacun des composants considérés se décline en deux types : composant ordinaire ou composant « vert ».

Tableau 3.1. Composants du produit fini

Composants	Description
Tissu	La matière principale qui forme la jacket. Ce dernier peut être de la laine naturelle à 100% ou bien un mélange de laine à 25% travaillée avec du polyester pour donner un aspect laine.
Doublure	C'est le tissu qui forme la face intérieure. Il peut être également en fibres biologique ou synthétique
Fourrure	C'est la matière du col de la jacket qui peut être de la fourrure naturelle ou synthétique.
Teinture	Peut être une teinture naturelle à base de plantes ou une teinture chimique.

3.4.2 Sites de production et coûts

Benetton est présent dans différents pays du monde non seulement à travers ses magasins de vente mais également à travers ses filières et ses sous traitants qui sont distribués particulièrement sur le pourtour méditerranéen, en Asie et dans quelques pays européens.

La fabrication des vêtements est un mélange de haute technologie et de main-d'œuvre. Benetton conserve les opérations de haute technologie pour gagner en économie d'échelle. Par contre le groupe sous traite les opérations nécessitant de la main d'œuvre à des petites entreprises de taille familiale ayant des structures de coûts plus faibles. Le tableau suivant (Tableau 3.2) présente les coûts horaires de main d'œuvre du secteur textile dans différents pays.

Nous considérons le cas où la localisation des sites potentiels de Benetton est déjà connue. Nous cherchons à déterminer les sites où chaque variante de produits finis sera fabriquée. Nous considérons donc quatre sites potentiels de confection qui sont situés en Chine, en Tunisie, en Pologne et en Italie.

Tableau 3.2. Moyenne des coûts horaires de la main d'œuvre du secteur textile⁶

Pays	Prix-minutes en €
Allemagne	0,341
France	0,271
Italie	0,251
USA	0,218
Portugal	0,127
Pologne	0,122
Turquie	0,112
Tunisie	0,093
Maroc	0,090
Chine	0,075
Inde	0,073

3.4.3 Fournisseurs

Dans notre cas, la considération de composants de natures différentes (ordinaire ou écologique) nous amène à considérer des fournisseurs de composants verts et des fournisseurs de composants ordinaires.

La considération de l'impact de l'activité de transport sur la qualité environnementale des produits, nous amène à considérer des fournisseurs locaux (pour chaque site de production) en plus des fournisseurs distants. Nous considérons donc quatre fournisseurs situés respectivement en Chine, en Tunisie, en Pologne et en Espagne.

⁶ D'après le rapport sur la stratégie Textile/Habillement en France.
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/084000121/0000.pdf>

3.4.4 Technologies de production

Nous avons décrit dans une section précédente certaines technologies alternatives utilisées par Benetton. Ces technologies qui sont plus « vertes », ont un impact moins important sur l'environnement que celles traditionnellement utilisées. Pour les procédés de production, notre interlocuteur à Benetton Tunisie, nous confirme l'existence de procédés de production différents dans le secteur de textile. Ces procédés diffèrent par leurs consommations d'énergie et les émissions des polluants. Nous nous sommes basés sur la littérature (Radulescu et al., 2009) afin de décrire quatre procédés de production et les quantités des émissions polluantes liées à chacun de ces procédés. Les détails sont donnés dans le chapitre 5.

3.4.5 Stratégie de transport

Dans le secteur du textile et de l'habillement, le fret aérien présente l'avantage d'une grande réactivité, moyennant des coûts environnementaux et financiers importants. Peu de secteurs d'activité ont une saisonnalité aussi forte. Il est donc essentiel pour une marque de planifier la rotation de ses collections le plus en amont possible (parfois même jusqu'à quatre saisons à l'avance), chose non évidente dans un secteur où les lignes de la mode changent d'une saison à l'autre.

Pour atteindre des niveaux élevés de réponse, la majorité des exportations sont transportées par avion. Néanmoins, pour les filiales Benetton qui sont sur le pourtour méditerranéen ou en Europe, il y a plus de flexibilité à utiliser la route ou la mer.

Nous considérons 4 scénarios de transport qui diffèrent par les coûts et les taux des émissions de carbone.

- Scénario 1: le transport routier est privilégié. Le camion est utilisé pour l'expédition.
- Scénario 2: le transport ferroviaire est privilégié. Nous considérons un mode de transport qui utilise le train électrique et / ou le train diesel.
- Scénario 3: le bateau est privilégié. Nous considérons dans ce cas une combinaison du bateau et du camion.
- Scénario 4: l'aérien est privilégié. Une combinaison de l'avion et du camion est considéré.

La Figure 3.4 et la Figure 3.5 montrent les quantités de CO₂ émises pour transporter une tonne de marchandise selon les scénarios considérés. Les quantités des émissions de carbone sont obtenues d'après le calculateur en ligne www.ecotransit.org.

Dans le cas de transport entre la Tunisie et Paris, le transport avec le train (scénario 2) est impossible (pas de route ferroviaire entre les deux pays).

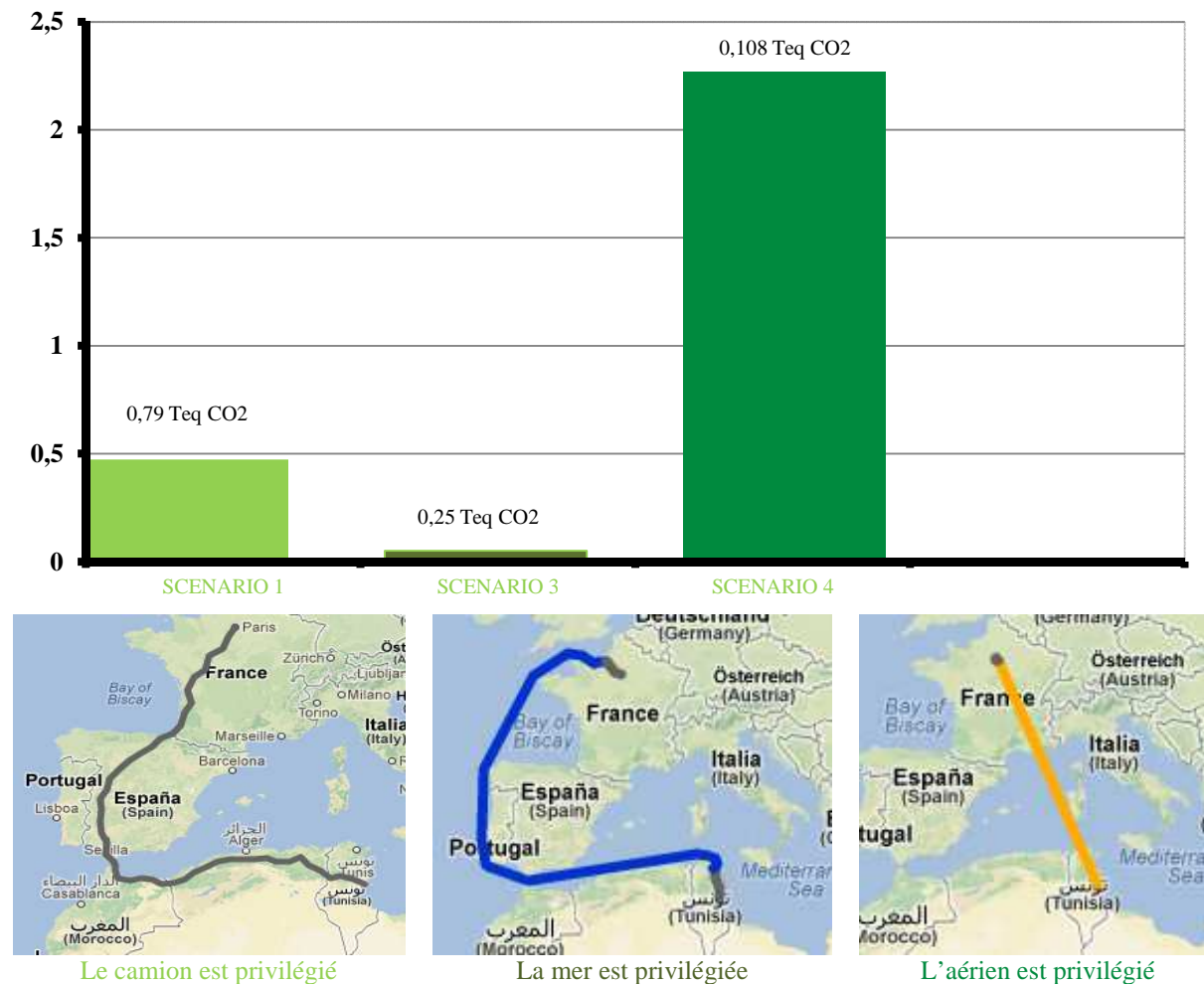


Figure 3.4. Estimation de l'empreinte carbone associée au transport d'une tonne de marchandise depuis Sousse (Tunisie) vers Paris (France) selon différents modes de transport.

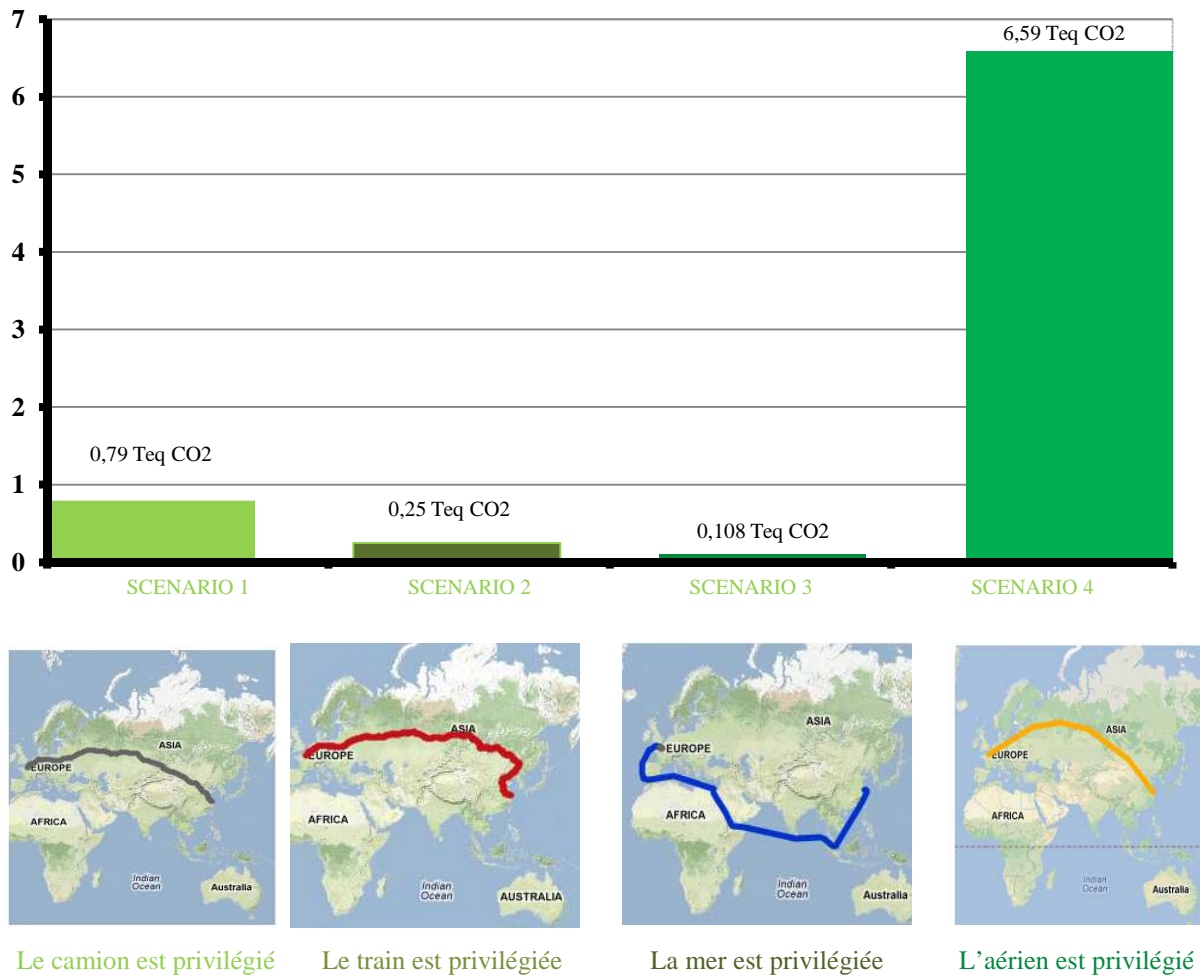


Figure 3.5. Estimation de l'empreinte carbone associée au transport d'une tonne de marchandise depuis Shanghai (Chine) vers Paris (France) selon différents modes de transport.

Les détails des scénarios de transport et les émissions de carbone liées aux différentes configurations et aux déplacements seront décrits dans le chapitre suivant.

Conclusion

L'étude de cas Benetton a permis d'illustrer notre démarche générale. Les données issues de cette étude sont utilisées dans les chapitres suivants pour tester et expérimenter les modèles que nous allons proposer. Selon l'objectif de l'expérimentation, différentes instances du problème vont être considérées.

**Chapitre IV : Modélisation de l'impact des décisions logistiques sur la qualité
environnementale des produits : problématique de localisation des usines et de choix du
mode de transport**

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons un modèle qui permet d'adresser une nouvelle complexité dans les modèles de conception des chaînes logistiques. En effet, nous nous intéressons ici à la corrélation entre les décisions de conception de la chaîne logistique (à savoir la sélection des fournisseurs, la localisation des sites et la sélection des modes de transport) et la qualité environnementale des produits fabriqués. De plus, nous modélisons la corrélation entre la qualité environnementale et la demande des produits.

La qualité environnementale est mesurée en se basant sur les émissions de carbone de l'activité de transport entre les différents nœuds de la chaîne logistique. Des expérimentations basées sur le cas du groupe Benetton montrent comment l'intégration de la qualité environnementale des produits et la considération de sa corrélation avec la demande peuvent modifier les décisions logistiques et impacter les performances économiques et environnementales d'une entreprise.

Nous considérons dans ce chapitre un seul attribut de la qualité environnementale (lié aux taux des émissions de carbone des activités de transport) et nous traitons le cas de mass marketing.

4.1 Présentation de la problématique

Nous considérons une entreprise qui opère dans un marché où la demande des produits dépend de leurs niveaux de qualité environnementale. En plus des clients ordinaires qui accordent principalement une importance aux prix de vente des produits, il y a d'autres clients qui sont sensibles à la qualité environnementale des produits. Ainsi nous considérons que la demande totale est la somme d'une demande de base et une demande qui dépend de la qualité environnementale du produit. Comme expliqué dans le chapitre 2, la demande de base est un paramètre d'entrée qui correspond à la demande des clients ordinaires et qui ne dépend pas de la qualité environnementale du produit. La demande qui dépend de la qualité environnementale des produits est celle des clients verts. On suppose que cette demande est croissante linéairement en fonction du niveau de la qualité environnementale qui est mesuré par un attribut environnemental noté β . Cet attribut varie entre 0 et 1. Si $\beta = 0$ alors le produit possède le plus bas niveau de qualité environnementale et par conséquent la demande qui dépend de la qualité environnementale est nulle. Si $\beta = 1$ alors la demande qui dépend de la qualité environnementale atteint son niveau maximum. Ainsi quand l'entreprise améliore la

qualité environnementale du produit, elle augmente sa part du marché en attirant des clients verts.

Nous considérons un seul produit fini qui est fabriqué avec quatre composants différents et qui est vendu à un prix donné, quelque soit le niveau de la qualité environnementale.

Nous considérons donc un seul attribut de qualité environnementale, lié aux émissions de carbone relatives aux différentes activités de transport entre les différents nœuds de la chaîne logistique (des fournisseurs vers les sites de production et des sites de production vers la zone clients). Afin de simplifier le calcul de l'attribut environnemental, nous considérons une seule zone clients. Cet attribut β est défini en détail dans le chapitre 2. Nous rappelons que le niveau des émissions dépend principalement de deux facteurs : la distance totale parcourue et les modes de transport utilisés. De toute évidence, la distance totale parcourue dépend des décisions de sélection des fournisseurs et de localisation des sites de production alors que le mode de transport utilisé correspond aux décisions de sélection du mode de transport.

L'attribut environnemental β , dépend de la quantité de réduction des émissions de carbone comparé avec le niveau maximum des émissions ω^{max} . Ce niveau maximum est obtenu quand nous résolvons le modèle avec seulement la demande de base (la demande des clients verts qui dépend de la qualité environnementale est considérée nulle). En effet, puisque la demande totale est égale à la demande de base, alors le modèle n'a pas intérêt à améliorer la qualité environnementale du produit. La fonction objectif, dans ce cas, n'est donc pas sensible à la qualité environnementale des produits. Ainsi, le modèle choisit la meilleure configuration de la chaîne logistique en termes de réduction des coûts sans considération de la qualité environnementale. Nous considérons cette configuration pour le calcul de la valeur de ω^{max} .

Dans notre modèle, les principales décisions logistiques, sont celles de sélection des fournisseurs des composants d'entrée, de localisation des sites de production et de sélection des modes de transport. Ces décisions permettent de déterminer la qualité environnementale du produit fini et par la suite, sa demande. Nous considérons différents fournisseurs et différents sites de production potentiels. Nous définissons quatre scénarios de transport qui diffèrent par les taux des émissions de carbone :

- Scénario 1 : le transport routier est privilégié. Dans ce cas, le camion est utilisé.
- Scénario 2 : le transport ferroviaire est privilégié. Nous considérons un scénario de transport qui utilise le train électrique et / ou diesel. Il est important de noter que les

émissions diffèrent selon le type du train (électrique ou diesel). Pour le calcul d'émissions de ce scénario, nous prenons en compte les différences entre ces deux types.

- Scénario 3 : le bateau est privilégié. Une combinaison de bateau – camion est considérée.
- Scénario 4 : l'avion est privilégié. Une combinaison avion – camion est considérée.

L'objectif du modèle est de maximiser le profit de l'entreprise qui est défini comme étant la différence entre les revenus et les coûts de l'entreprise. Les revenus sont obtenus à partir des ventes du produit fini pour les clients ordinaires et les clients verts. Les coûts sont relatifs aux coûts d'achat des composants d'entrée (qui incluent les coûts de transport depuis les fournisseurs vers les sites de production), aux coûts de transport du produit fini à partir des sites de production vers la zone clients et aux coûts fixes et opérationnels des sites de production. Les coûts de transport dépendent bien sûr, du mode de transport choisi.

4.2 Formulation du modèle

Tout d'abord, nous considérons une version simple du modèle dans laquelle nous considérons que les sites de production ont une capacité infinie et nous imposons qu'un seul fournisseur par composant et un seul site de production soient sélectionnés. Ces contraintes d'unicité de site de production et de fournisseur, permettent de présenter une première modélisation simple de l'attribut environnemental β . Nous notons ce modèle par **MLT1** (**M**odèle de **L**ocalisation des sites et choix de modes de **T**ransport version **1**). Ensuite, nous étendons ce modèle en considérant le cas où les capacités de production sont finies et nous supprimons les restrictions sur le nombre de sites de production. Etant donné que les produits peuvent être fabriqués dans des sites de production différents, les distances parcourues ainsi que les moyens de transport utilisés pour l'acheminement des composants et des produits finis peuvent être différents. Par conséquent, les produits issus de sites de productions différents peuvent avoir des émissions de carbone différentes. Ainsi les produits fabriqués n'auront pas la même valeur de d'attribut environnemental. Ce qui nous amène à proposer une formulation différente de l'attribut environnemental β (par rapport à celle proposée dans le modèle **MLT1**). Nous verrons dans les sections suivantes que suite à la suppression des contraintes d'unicité de site de production et de fournisseur, la détermination de l'attribut environnemental est plus délicate que dans **MLT1**. Nous notons ce modèle par **MLT2**.

Les modèles présentés sont des programmes linéaires en nombre entiers. Nous introduisons dans ce qui suit les notations qui seront utilisées pour développer la formulation mathématique.

Paramètres :

- P : ensemble des produits d'entrée (composants),
- J : ensemble potentiel des sites de production,
- S : ensemble potentiel des fournisseurs,
- M : ensemble potentiel des scénarios de transport,
- δ_p : quantité de composant p nécessaire pour la production d'une unité de produit fini,
- β_{mj} : quantité des émissions de carbone dégagée pour le transport d'une unité de produit fini depuis le site de production j vers la zone clients avec le scénario de transport m ,
- β_{pmsj} : quantité des émissions de carbone dégagée pour le transport d'une unité du composant p depuis le fournisseur s vers le site de production j avec le scénario de transport m ,
- A : prix unitaire de vente du produit fini,
- \bar{D} : demande de base (des clients ordinaires),
- PC_{pmsj} : coût unitaire d'achat du composant p du fournisseur s par le site j en le transportant avec le scénario de transport m . Ceci inclut le coût de transport,
- FC_j : coût fixe amorti d'implantation du site j ,
- MC_j : coût unitaire de production du produit fini dans le site j ,
- DC_{jm} : coût unitaire de transport du produit fini depuis le site de production j vers la zone clients avec le scénario de transport m .

Variables de décision:

Les principales variables de décision du modèle sont les suivantes:

- y_j : égale à 1 si le site de production j est ouvert, 0 sinon,
- y_{pmsj} : égale à 1 si le composant p est transporté avec le scénario m depuis le fournisseur s vers le site de production j , 0 sinon.
- y_{mj} : égale à 1 si le produit fini est transporté avec le scénario de transport m depuis le site de production j vers la zone clients, 0 sinon,
- v_{pmsj} : quantité du composant p transportée depuis le fournisseur s vers le site de production j avec le scénario de transport m ,

- x_j : quantité du produit fini fabriquée dans le site j ,
- w_{mj} : quantité de produit fini transportée du site j vers la zone clients avec le scénario de transport m ,
- d : demande totale du produit fini.

4.2.1 Modèle à un seul fournisseur, un seul site de production avec capacité infinie

Nous présentons tout d'abord le modèle *MLTI* dans lequel nous considérons une capacité infinie pour les sites de production. Comme expliqué avant, pour pouvoir présenter une première modélisation simple de l'attribut environnemental, nous imposons dans ce modèle, qu'un seul fournisseur et un seul site de production soient sélectionnés.

Fonction objectif:

La fonction objectif du modèle consiste à maximiser le profit total qui est la différence entre les revenus de la vente du produit fini et le coût total engendré. Nous supposons que toute la quantité fabriquée est transportée et vendue aux clients. Ainsi, les revenus sont donnés par $A \sum_j x_j$. Les coûts regroupent les coûts d'achat, les coûts fixes des sites de production, les coûts variables de production et les coûts de transport à partir des sites de production vers la zone clients. La fonction objectif s'exprime alors comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi = & A \sum_j x_j - \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PC_{pmsj} v_{pmsj} - \sum_j FC_j y_j - \sum_j MC_j x_j \\ & - \sum_j DC_{jm} w_{mj} \end{aligned}$$

Les contraintes du modèle:

Dans ce qui suit, nous présentons les contraintes du modèle.

Les contraintes exprimant la qualité environnementale du produit :

La contrainte (1) permet de déterminer l'attribut de la qualité environnementale β pour une unité du produit fini. En effet, β est un ratio qui représente la réduction des émissions de carbone comparé au niveau maximum des émissions ω^{\max} . Dans le numérateur, nous retrouvons la quantité de réduction des émissions qui est : $\omega^{\max} -$ les émissions de carbone correspondant au transport des composants nécessaires pour la fabrication d'une unité de

produit fini – les émissions de carbone correspondant au transport d'une unité de produit fini. Rappelons que nous calculons ω^{max} en considérant une version modifiée de notre modèle et dans laquelle la qualité environnementale du produit n'est pas prise en compte.

L'attribut de la qualité environnementale β varie entre 0 (niveau minimum de la qualité environnementale) et 1 (niveau maximum de la qualité environnementale).

$$\beta = \frac{\omega^{max} - \sum_m \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \delta_p \beta_{pmsj} y_{pmsj} - \sum_j \sum_m \beta_{mj} y_{mj}}{\omega^{max}} \quad (1)$$

Contrainte exprimant la demande:

La demande totale est la somme de la demande de base \bar{D} et la demande des clients verts qui est donnée par $\alpha * \beta$ où α est un coefficient positif qui représente la sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit.

$$d = \bar{D} + \alpha * \beta \quad (2)$$

La quantité totale fabriquée (et vendue) du produit fini ne peut pas dépasser la demande totale. Ceci est garanti par la contrainte (3).

$$\sum_j \sum_m w_{jm} \leq d \quad (3)$$

Contraintes de conservation des flux

Les contraintes suivantes représentent les conditions de conservation des flux. Selon la contrainte (4), la quantité totale transportée à partir d'un site de production donné j est égale à la quantité totale fabriquée dans ce site j . La quantité totale nécessaire d'un composant donné p pour la production totale (i.e., $\delta_p x_j$) est égale à la quantité totale de ce composant p achetée chez les différents fournisseurs (5).

$$\sum_m w_{jm} = x_j \quad j \in J \quad (4)$$

$$\sum_m \sum_s v_{pmsj} = \delta_p x_j \quad p \in P, j \in J \quad (5)$$

Les contraintes logiques

Nous supposons qu'un seul mode de transport peut être utilisé sur chaque lien (entre deux nœuds) de la chaîne logistique, comme c'est le cas dans la plupart des situations réelles. Les contraintes (6) et (7) imposent respectivement qu'un seul mode de transport soit sélectionné pour acheminer un composant donné à partir d'un fournisseur s vers un site de production j et

qu'un seul mode de transport soit sélectionné pour l'acheminement du produit fini à partir d'un site de production donné j vers la zone clients.

$$\sum_m y_{pmsj} \leq 1 \quad p \in P, s \in S, j \in J \quad (6)$$

$$\sum_m y_{mj} \leq 1 \quad j \in J \quad (7)$$

Dans le modèle **MLTI**, nous supposons que, au plus, un site de production peut être ouvert. Ceci est exprimé par la contrainte (8). En plus, nous supposons qu'un seul fournisseur peut être sélectionné pour chaque composant et chaque site. Ceci est imposé par la contrainte (9).

$$\sum_j y_j \leq 1 \quad j \in J \quad (8)$$

$$\sum_s \sum_m y_{pmsj} \leq 1 \quad p \in P, j \in J \quad (9)$$

Un site de production est ouvert si et seulement si il génère des sorties (*i.e.*, $x_j > 0$). Ceci est garanti par la contrainte (10).

$$\frac{1}{\psi} y_j \leq x_j \leq \psi y_j \quad j \in J \quad (10)$$

Les contraintes (11) et (12) assurent qu'un mode de transport n'est sélectionné sur un arc de la chaîne logistique que s'il est utilisé pour le transport des produits sur cet arc. La contrainte (11) concerne la sélection des modes de transport entre les fournisseurs et les sites de production et la contrainte (12) concerne le choix de mode de transport entre les sites de production et la zone des clients.

$$\frac{1}{\psi} y_{mj} \leq w_{mj} \leq \psi y_{mj} \quad m \in M, j \in J \quad (11)$$

$$\frac{1}{\psi} y_{pmsj} \leq v_{pmsj} \leq \psi y_{pmsj} \quad p \in P, m \in M, s \in S, j \in J \quad (12)$$

Finalement, nous introduisons les contraintes de non négativité et les contraintes binaires :

$$\beta, d, w_{mj}, v_{pmsj}, x_j \geq 0 \quad (13)$$

$$y_j, y_{mj}, y_{pmsj} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

4.2.2 Modèle à plusieurs fournisseurs, plusieurs sites et des capacités finies (*MLT2*)

Maintenant, nous étendons le modèle *MLT1* en considérant des capacités finies pour les sites de production et nous éliminons les restrictions sur le nombre de sites de production qui peuvent être sélectionnés. Nous supprimons dans ce cas la contrainte (8). Par contre, nous considérons toujours que chaque site de production peut sélectionner un seul fournisseur par composant. Ainsi la contrainte (9) reste valable. Par ailleurs, nous rajoutons une contrainte relative à la capacité de production (15). Nous introduisons le paramètre C_j^{max} qui représente la capacité maximale qui peut être installée dans le site de production j .

$$x_j \leq C_j^{max} \quad j \in J \quad (15)$$

Si plusieurs sites de production peuvent être sélectionnés, on peut alors avoir plusieurs variantes du produit fini (en termes de qualité environnementale). En effet, la qualité environnementale d'un produit fini donné dépend des transports entre sites (fournisseurs-site production-client) et donc du site de production où il est fabriqué. Ainsi, nous définissons la nouvelle variable β_j qui représente l'attribut de la qualité environnementale relatif à la variété du produit fini fabriqué dans le site de production j .

Nous ajoutons alors la contrainte suivante pour déterminer β_j .

$$\beta_j = \frac{\omega^{max} - (\sum_m \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \delta_p \beta_{pmsj} y_{pmsj} + \sum_m \beta_{jm} y_{jm})}{\omega^{max}} \quad j \in J \quad (16)$$

Lorsque le produit est mis sur le marché, un niveau unique de la qualité environnementale β doit être communiqué aux clients. Nous devons déterminer la valeur de β afin de pouvoir déterminer la demande totale de notre modèle. Une approche judicieuse pour ne pas tromper les clients et ne pas tomber dans la publicité mensongère, est de considérer la valeur de β comme étant le minimum des β_j ($\beta = \min(\beta_j, j \in J)$). Il s'agit ici d'une fonction non linéaire. Pour la linéarisation, nous rajoutons la contrainte (17). En effet, si le site de production j est ouvert ($y_j = 1$) alors la contrainte devient $\beta \leq \beta_j, j \in J$. Dans le cas contraire, la contrainte devient triviale puisque β varie entre 0 et 1.

$$\beta \leq \beta_j + (1 - y_j) \quad j \in J \quad (17)$$

4.3 Expérimentations des modèles

Dans nos modèles, l'amélioration de la qualité environnementale du produit fini conduit à l'augmentation de la demande et, par conséquent, à l'augmentation des revenus de l'entreprise. Toutefois, ceci peut conduire à éviter la sélection des sites de production distants qui ont généralement des coûts réduits. Le but de ces expérimentations est d'évaluer l'impact de l'intégration de la corrélation entre la demande et la qualité environnementale du produit sur les décisions de la chaîne logistique et sur les performances économiques et environnementales de l'entreprise.

4.3.1 Description de l'étude de cas

Nous considérons l'étude de cas de la compagnie Benetton décrite dans le chapitre précédent. Nous rappelons que les fournisseurs et les sites de production potentiels se trouvent en Chine, en Tunisie, en Italie et en Pologne. Le produit fini est acheminé vers la zone des clients (centre de distribution (CD)) qui se trouve en Italie. La figure 4.1 résume la structure de la chaîne logistique considérée.

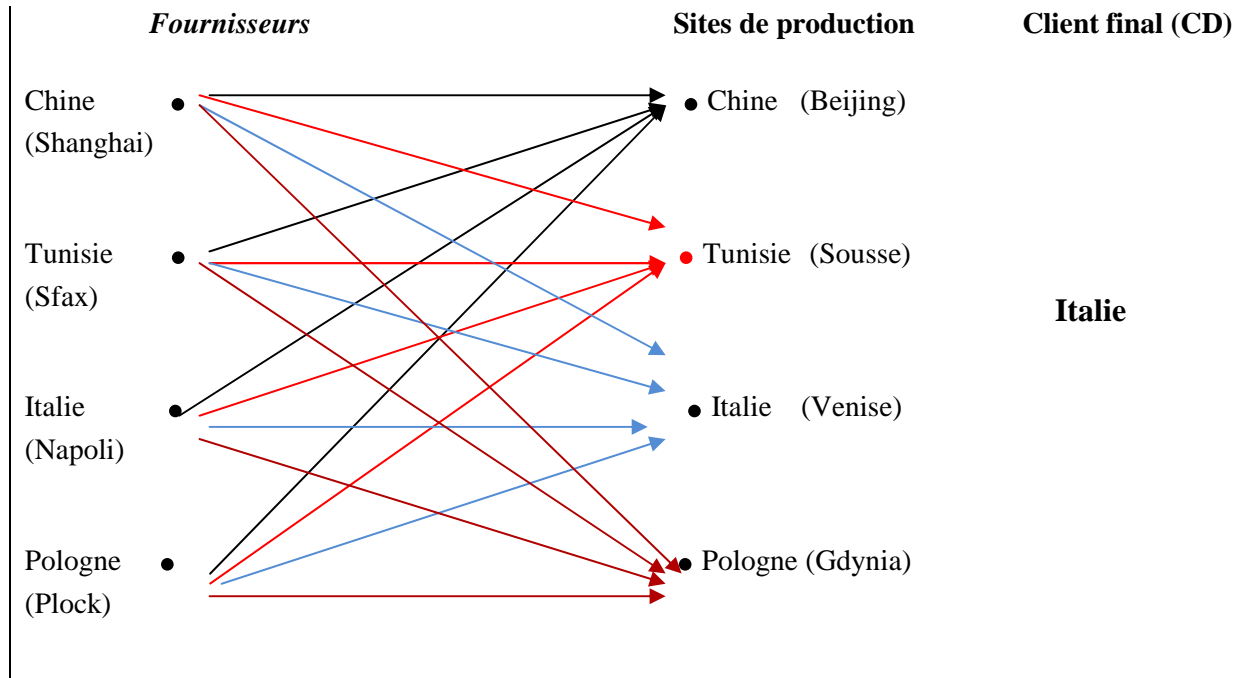


Figure 4.1. Structure de la chaîne logistique considérée

Comme indiqué avant, nous considérons 4 scénarios potentiels de transport qui diffèrent par leurs quantités d'émissions de carbone émises et également par leurs coûts. Nous considérons un seul produit fini qui est une jacket pour femme de taille moyenne et nous considérons

quatre produits d'entrée (composants notés par *P1*, *P2*, *P3* et *P4*) qui sont respectivement le tissu constituant la jacket, la doublure, la fourrure du col et les colorants. A titre d'exemple, le tableau 4.1 donne les coûts d'achat et les taux des émissions de carbone dégagés lors du transport du composant du tissu principal de la jacket (composant *P1*) à partir des fournisseurs potentiels vers le site de production situé en Chine, en utilisant les différents modes de transport potentiels. Les coûts d'achat incluent les coûts de transport du composant à partir des fournisseurs vers le site de production. Nous avons aussi défini les autres coûts et émissions de carbone liés à l'achat et au transport du tissu principal depuis les fournisseurs potentiels vers les autres sites de production ainsi que les données similaires pour les autres composants.

Pour le calcul des émissions de carbone, nous avons eu recours au calculateur en ligne www.ecotransit.org. La détermination des taux des émissions de carbone est basée sur des données relatives au moyen de transport utilisé, à la distance parcourue et au poids du composant transporté. Nous considérons que pour une unité de produit fini, un kilogramme du composant *P1* est utilisé. Le produit fini et emballé pèse deux kilogrammes.

Le tableau 4.2 représente les quantités des émissions de carbone et les coûts de transport du produit fini à partir des sites de production potentiels vers la zone des clients. Nous considérons dans ce qui suit la demande mondiale mensuelle pour les jackets pour femmes, qui est égale à 200000 (toutes tailles et toutes couleurs confondues sachant que la gamme comporte huit couleurs et cinq tailles différentes de la taille 36 à la taille 44). Nous travaillons sur un produit fini moyen. Finalement, dans le tableau 4.3 nous présentons les valeurs de la demande de base et les différents coûts et prix considérés.

Tableau 4.1. Quantité de carbone dégagée et coûts d'achat du composant *P1* par le site de production Chinois.

	<i>Fournisseur Chinois</i>		<i>Fournisseur Tunisien</i>		<i>Fournisseur Italien</i>		<i>Fournisseur Polonais</i>	
	Emissions (g CO ₂)	Coût (€)	Emissions (g CO ₂)	Coût (€)	Emissions (g CO ₂)	Coût (€)	Emissions (g CO ₂)	Coût (€)
<i>Scénario1 (Camion)</i>	97	3,82	820	12,28	717	13,29	595	10,87
<i>Scénario2 (train)</i>	47	3,31	Pas de voie ferrée		216	9,56	182	7,87
<i>Scénario3 (avion)</i>	1577,1	5,3	6250	23,04	5834	23,4	5047	19,55
<i>Scénario4 (bateau)</i>	24	3,24	150	7,86	97	9,8	172	9,38

Tableau 4.2. Quantité de carbone dégagée et coûts de transport du produit fini à partir des sites de production potentiels vers la zone des clients.

	<i>Sites de production</i>							
	<i>Site Chinois</i>		<i>Site Tunisien</i>		<i>Site Italien</i>		<i>Site Polonais</i>	
	(g CO ₂)	(€)	(g CO ₂)	(€)	(g CO ₂)	(€)	(g CO ₂)	(€)
<i>Scénario1</i> (camion)	1394	12,2	533,9	4,75	54,7	0,49	219,2	1,96
<i>Scénario2</i> (train)	406	4,8	Pas de voie ferrée		12,5	0,17	65,8	0,75
<i>Scénario3</i> (avion)	11580	31	3163,9	4,36	1710,7	1,69	3556,8	5,12
<i>Scénario4</i> (bateau)	220	5,4	52,4	0,23	61,8	0,46	120,9	1,08

Tableau 4.3. Paramètres et coûts du modèle

Demande de base (\bar{D}) : 200000

Prix unitaire de vente du produit fini (A) : 100

Coûts fixes amortis des sites de production (FC_j) : $FC_1=2000$, $FC_2=3000$, $FC_3=5000$, $FC_4=3600$

Coût unitaire de production (MC_j) : $MC_1=13.5$, $MC_2=16.74$, $MC_3=45.18$, $MC_4=21.96$

Quantité du composant p nécessaire pour une unité de produit fini (δ_p): 1, 1, 1, 1

Notons que : $j=1$ = Chine, $j=2$ = Tunisie, $j=3$ = Italie, $j=4$ = Pologne.

Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord les expérimentations du modèle *MLT1* ensuite celles du modèle *MLT2*.

4.3.2 Résultats du modèle *MLT1* : un fournisseur, un site de production avec capacité infinie

A travers ces expérimentations, nous cherchons principalement à évaluer l'impact de l'intégration de la qualité environnementale dans le modèle proposé *MLT1* sur les décisions logistiques et le profit de l'entreprise. Pour ce faire, nous proposons un modèle équivalent au modèle *MLT1* mais dans lequel la qualité environnementale des produits n'est pas intégrée. Nous notons ce modèle *MLT0*. A l'exception, de l'intégration de l'attribut de la qualité environnementale du produit et sa corrélation avec la demande, les deux modèles reposent sur les mêmes hypothèses. Ainsi, la différence majeure entre ces deux modèles concerne la modélisation de la demande. Etant donné que la qualité environnementale des produits n'est

pas intégrée dans *MLT0*, alors la demande dans ce cas est considérée comme un paramètre et non pas une variable de décision. Ceci signifie que bien que la demande du marché dépende de la qualité environnementale du produit, l'entreprise ne tient pas compte de cette relation lorsqu'il s'agit de la sélection des fournisseurs, de localisation des sites et de choix des scénarios de transport.

Notre approche expérimentale est basée sur les étapes suivantes :

- Tout d'abord, nous élaborons le modèle *MLT0* dans lequel la qualité environnementale n'est pas considérée (demande totale = demande de base). Nous résolvons le modèle *MLT0* avec le logiciel d'optimisation Cplex dans le but d'obtenir la valeur de ω^{max} . Nous obtenons $\omega^{max} = 466$ grammes CO2 par produit fini vendu. Nous obtenons également le profit optimal de l'entreprise lorsque la qualité environnementale du produit n'est pas intégrée. Nous le notons par G_0 . Les décisions du modèle qui correspondent à la solution optimale de *MLT0* sont les suivantes :

Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → train → Italie (CD)

- Ensuite, nous résolvons le modèle *MLT1* en fixant ω^{max} à sa valeur obtenue en considérant *MLT0*. Nous rappelons que dans le cas de *MLT1*, la demande est exprimée en fonction de la qualité environnementale du produit ($d = \bar{D} + \alpha * \beta$). Par exemple, si la sensibilité du marché pour la qualité environnementale du produit est égale à 10000 alors la demande totale peut varier entre 200000 (quand $\beta = 0$) et 210000 (quand $\beta = 1$). Nous résolvons *MLT1* avec Cplex et nous obtenons le profit optimal que nous notons par G_1 .
- Finalement, nous comparons G_1 avec G_0 . Nous définissons le pourcentage de gain, g , qui résulte de la considération du modèle intégré *MLT1* au lieu du modèle *MLT0*, comme suit : $g = \frac{(G_1 - G_0) * 100}{G_0}$. En d'autres termes, g représente le gain relatif que l'entreprise peut réaliser si elle intègre la qualité environnementale des produits dans l'optimisation de ses décisions logistiques, comparé au cas où la qualité environnementale des produits n'est pas considérée.

Nous récapitulons dans le tableau 4.4 les résultats obtenus pour quatre valeurs différentes de la sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit (α). Dans ce tableau 4.4 ainsi que pour le reste des expérimentations, les décisions logistiques sont représentées sous la forme suivante :

Fournisseurs → mode de transport → Site de production → mode de transport → Zone Clients

Tableau 4.4. Résultats pour différentes valeurs de la sensibilité du marché (α)

Sensibilité du marché (α)	Décisions logistiques	Emissions Carbone (grammes CO_2)/unité de produit fini	g : % gain (économique) $\frac{(G_1 - G_0) * 100}{G_0}$
		Attribut environnemental (β)	
10000	Chine → bateau → Chine → bateau → Italie	280	5,2%
		0,39	
30000	Chine → bateau → Chine → bateau → Italie	280	12,2 %
		0,39	
90000	Tunisie → train → Tunisie → bateau → Italie	70,4	24,6%
		0,84	
200000	Tunisie → train → Tunisie → bateau → Italie	70,4	61,9%
		0,84	

En observant le tableau 4.4 nous dégagons ce qui suit :

- Les solutions du modèle *MLT1* en termes des décisions de sélection des fournisseurs, et/ou de localisation des sites de production et/ou de choix de modes de transport diffèrent des solutions logistiques du modèle *MLT0*. Cela prouve que l'intégration de la qualité environnementale conduit à modifier complètement la conception de la chaîne logistique. Les décisions de la chaîne logistique ainsi que les valeurs de gain dépendent de la sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit.
- Pour $\alpha = 30000$, la demande totale varie entre 200000 et 230000. Dans ce cas, la solution du modèle *MLT1* est similaire à la solution du modèle *MLT0* en termes de sélection des fournisseurs et de localisation des sites de production. Par contre, dans le modèle *MLT1*, le

transport du produit fini est assuré par le bateau contrairement à la solution du modèle *MLT0* où le train est utilisé. L'utilisation du bateau dans le cas de *MLT1* conduit à la réduction des émissions de carbone de 466 à 280 grammes. L'attribut environnemental β dans le cas *MLT1*, est égal à 0,39. Bien que l'utilisation du bateau dans ce cas soit plus chère (recours au transport routier à plusieurs reprises en alternance avec le bateau), les coûts de transport sont compensés par l'augmentation des ventes de l'entreprise suite à l'amélioration de la qualité environnementale du produit.

- Pour $\alpha = 90000$, la demande varie entre 200000 et 290000. Le modèle opte pour une solution où les fournisseurs et les sites de production sont géographiquement proches de la zone des clients. Le choix des fournisseurs et des sites de production en Tunisie, permet de réduire significativement les quantités des émissions de carbone (70,4 grammes au lieu de 280 grammes). L'attribut de la qualité environnementale β passe dans ce cas à 0.84 (au lieu de 0,39). Bien que la sélection des fournisseurs et des sites de production situés en Tunisie, augmente de façon significative les coûts de l'entreprise (par rapport au cas de la Chine), cette augmentation des coûts est compensée par l'augmentation des ventes. Le pourcentage de gain g est égal à 24,6%. Ce gain prouve la pertinence du modèle *MLT1* proposé et justifie l'intérêt de son adoption par les entreprises.
- Nous étendons ces expérimentations en considérant différentes valeurs de la sensibilité du marché (α). Les résultats sont résumés dans les figures 4.2, 4.3 et 4.4 qui présentent respectivement, la variation de la qualité environnementale du produit fini (β), la variation du pourcentage de gain (g) et des coûts globaux de l'entreprise, la variation des coûts par unité de produit fini (coûts d'achat des composants + coût unitaire de production + coût unitaire de transport par produit fini) en fonction de α . Dans la figure 4.5, nous présentons la variation de la quantité des émissions de carbone par unité de produit fini et la quantité des émissions de carbone pour la quantité totale fabriquée, en fonction de α .
- En observant la Figure 4.2, nous remarquons que plus la sensibilité du marché (α) est importante, plus la qualité environnementale du produit augmente.

NB : L'attribut environnemental varie par palier en fonction de la sensibilité du marché. Lorsque α varie entre 10000 et 80000 par exemple, malgré l'augmentation de la demande, l'attribut environnemental reste constant.

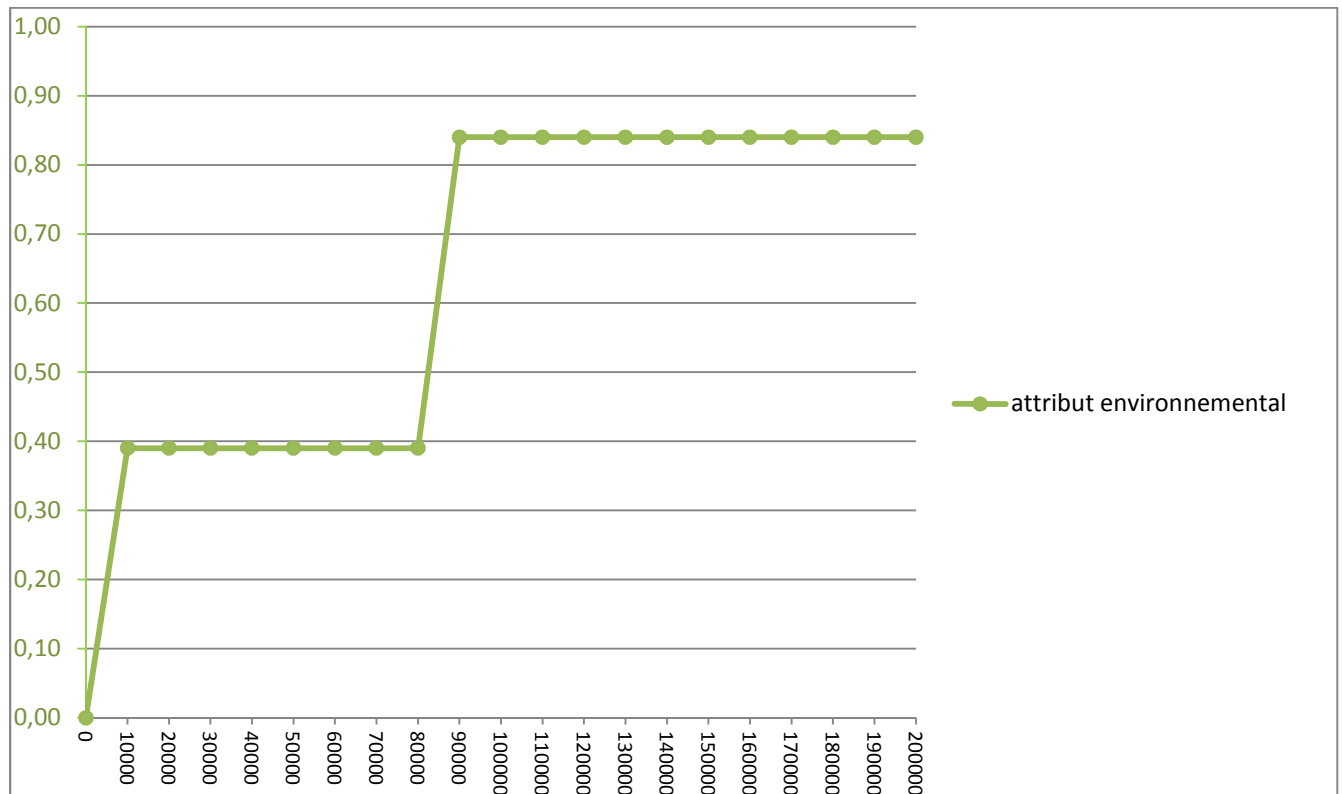


Figure 3.2. Variation du niveau de la qualité environnementale du produit fini en fonction de la sensibilité du marché (α)

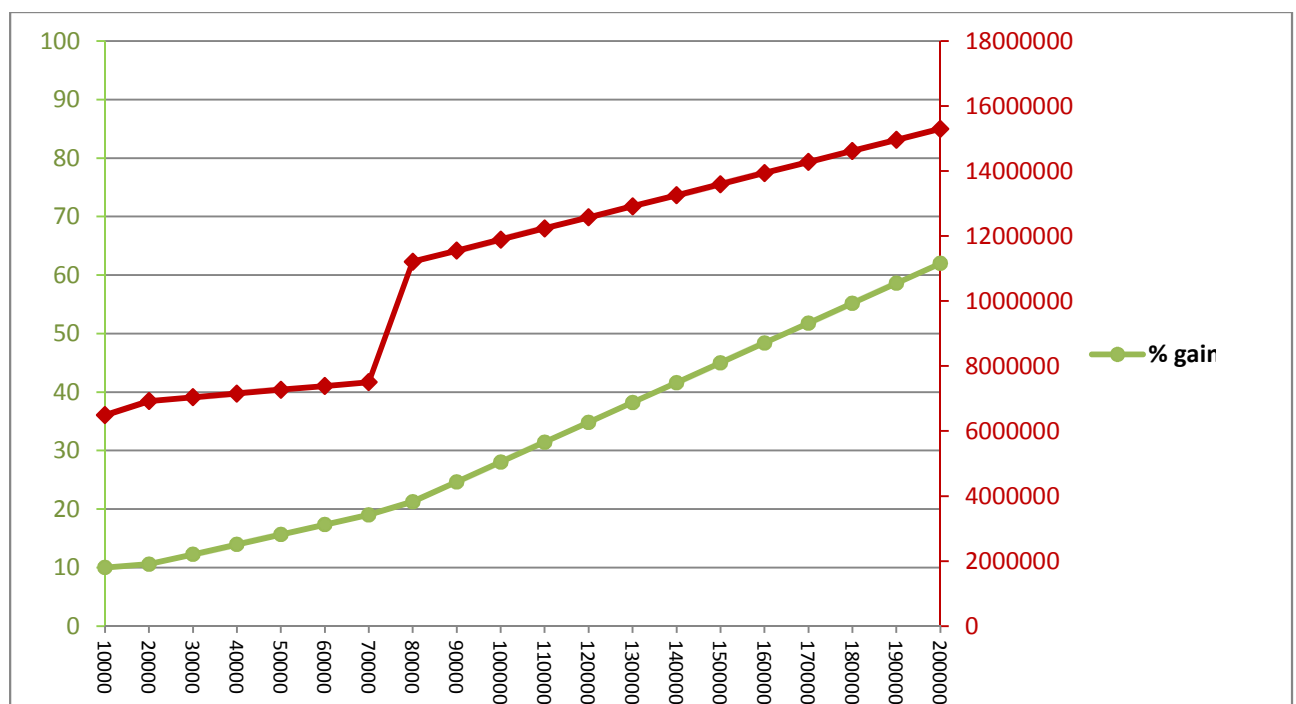


Figure 4.3. Impact de la sensibilité du marché (α) sur le % gain (g) et sur les coûts globaux de l'entreprise.

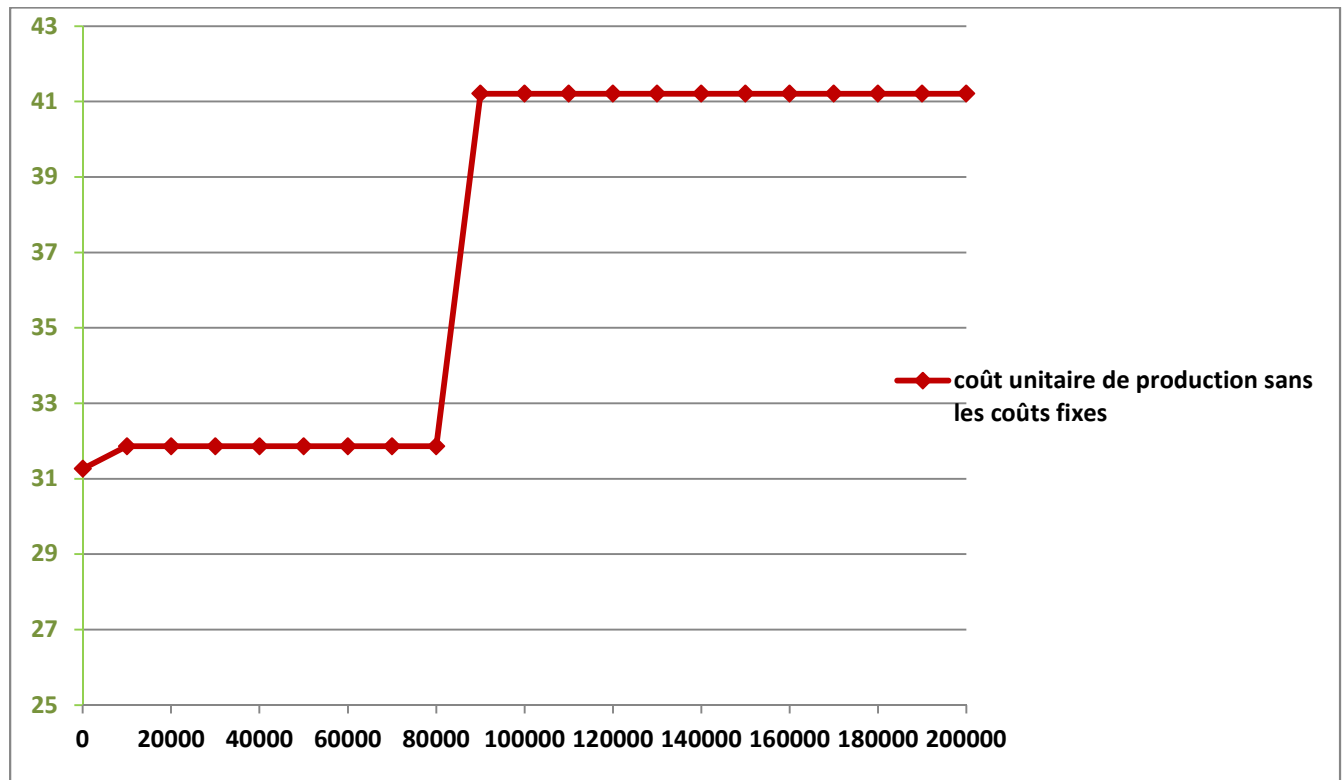


Figure 4.4. Impact de la sensibilité du marché sur le coût unitaire par produit fini

A partir des figures 4.3 et 4.4, nous déduisons les résultats suivants :

- Plus la sensibilité du marché est importante, plus le gain réalisé suite à la considération de la qualité environnementale des produits dans les modèles de décisions logistiques, devient important.
- L'augmentation de la sensibilité du marché conduit à augmenter les coûts globaux (coûts engagés pour la fabrication de la quantité totale vendue) de l'entreprise. Cette augmentation des coûts globaux peut s'expliquer intuitivement par la croissance de la quantité fabriquée (vendue) suite à l'augmentation de la demande (sensibilité du marché). Afin d'étudier la question de plus près, nous avons tracé la courbe des coûts unitaires (Figure 4.4).
- En observant la Figure 4.4, nous remarquons que l'augmentation de la sensibilité du marché conduit à l'augmentation des coûts par produit fini. En effet, afin d'améliorer la qualité environnementale du produit fini, le modèle opte pour la sélection des fournisseurs et des sites de production qui sont plus proches de la zone des clients. Bien que cette

solution engendre des coûts plus importants, cette augmentation des coûts est compensée par l'augmentation des revenus.

En observant la Figure 4.5 de la variation des émissions globales en fonction de la sensibilité du marché, nous déduisons les résultats suivants :

- L'augmentation de la sensibilité du marché conduit à la diminution de la quantité des émissions de carbone par unité de produit fini. La quantité totale des émissions de l'entreprise a généralement une tendance à diminuer, mais comme le montre la Figure 4.5 dans certains cas, ces émissions peuvent augmenter. Ceci s'explique par l'augmentation des quantités produites. En effet, si α augmente alors le modèle améliore la qualité environnementale du produit afin d'augmenter la demande. Ceci peut conduire à l'augmentation des émissions totales malgré la baisse des émissions par unité de produit.

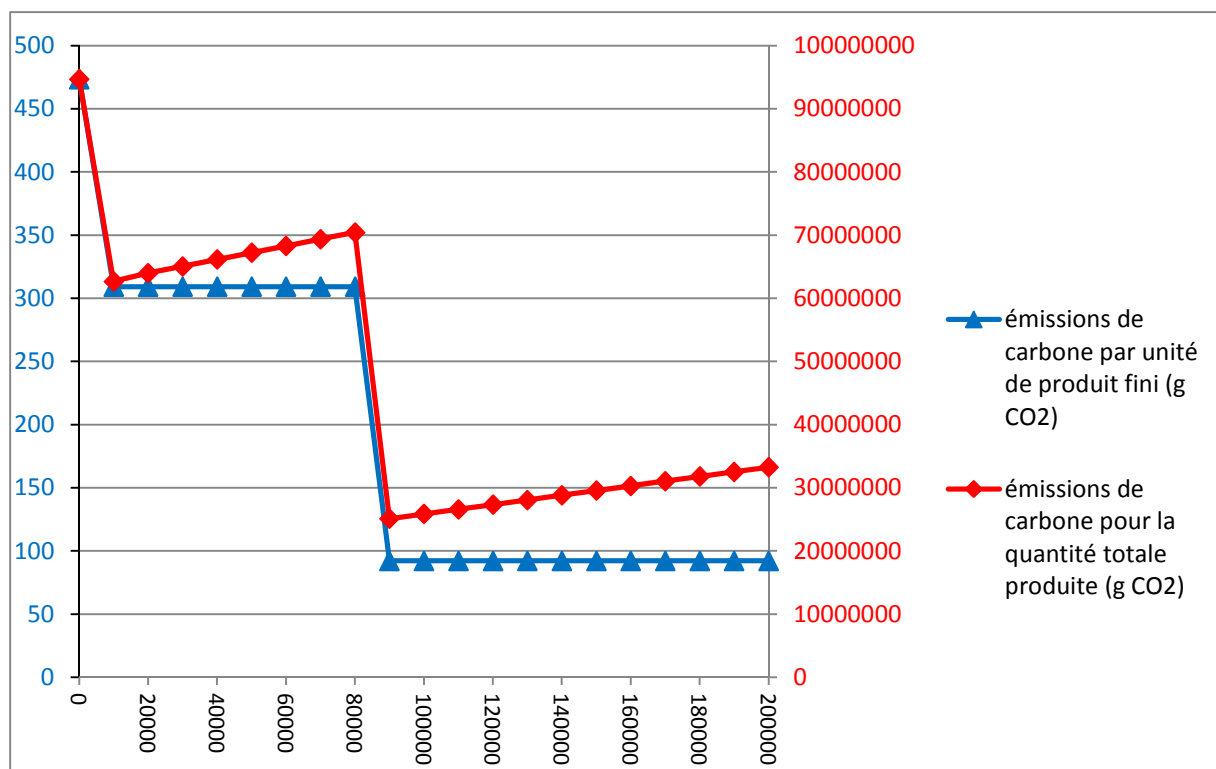


Figure 4.5. Impact de la sensibilité du marché (α) sur les émissions totales de carbone et les émissions par unité de produit fini.

4.3.3 Résultats du modèle MLT2 : plusieurs fournisseurs et plusieurs sites de production avec capacités finies

Pour les expérimentations du modèle *MLT2*, nous traitons le cas de plusieurs sites de production avec des capacités finies. Les capacités maximales des sites de production potentiels sont égales à 150000 pièces / mois pour chaque site, alors que la demande de base est de 200000.

Notre approche d'expérimentation est similaire à celle considérée pour le modèle *MLT1* :

- Tout d'abord, nous élaborons le modèle *MLT0'* dans lequel la qualité environnementale n'est pas considérée (modèle *MLT0* avec capacités finies pour les sites de production et demande totale = demande de base). Nous résolvons le modèle *MLT0'* en considérant les capacités finies des sites de production. Les décisions du modèle qui correspondent à la solution optimale de *MLT0'*, dans ce cas, est composée de deux flux qui correspondent à l'ouverture de deux sites à savoir le premier en Chine et le deuxième en Tunisie. Les flux correspondants sont les suivants :

Tableau 4.5. Résultats du MLT0 en considérant plusieurs sites de production avec des capacités finies

Solutions logistiques :	Emissions Carbone/unité de produit fini (grammes CO ₂)	Quantités fabriquées dans l'usine sélectionnée
Flux 1 : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → train → Italie	466	150000 pièces en Chine
Flux 2 : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie	378,7	50000 pièces en Tunisie

- La majorité de la quantité demandée (150000 sur 200000) est fabriquée en Chine avec des fournisseurs locaux. Le reste de la quantité demandée (50000) est fabriquée en Tunisie avec des fournisseurs chinois pour les quatre composants considérés. Pour définir la référence ω^{max} , nous nous proposons de considérer les émissions liées à la variété la plus prépondérante en termes de quantités. D'après les résultats du tableau 4.5, la valeur de

ω^{max} est égale à **466** grammes CO2 (par unité de produit fini). Nous obtenons également le profit optimal de l'entreprise lorsque la qualité environnementale du produit n'est pas intégrée. Nous le notons par g_0 .

- Ensuite, nous résolvons le modèle *MLT2* en fixant ω^{max} à sa valeur obtenue en considérant *MLT0'*. Nous présentons dans le tableau 4.6 les résultats obtenus en termes de solutions logistiques, de quantités fabriquées, d'émissions de carbone dégagées et de valeur de l'attribut de la qualité environnementale.

En observant le tableau 4.6, nous déduisons les résultats suivants :

- Pour $\alpha = 10000$, la demande totale varie entre 200000 et 210000. Dans ce cas, deux sites de production sont ouverts à savoir en Chine et en Tunisie. L'attribut environnemental du produit fabriqué dans l'usine située en Chine β_1 est égal à 0 et l'attribut environnemental du produit fabriqué en Tunisie β_2 est égal à 0,18. La qualité environnementale considérée pour le calcul de la demande est 0. La sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit n'est pas assez grande dans ce cas, pour permettre d'améliorer la solution logistique et d'augmenter la qualité environnementale du produit. La solution du modèle *MLT2* est donc la même que celle du modèle *MLT0'*.
- Pour $\alpha = 20000$, la demande varie entre 200000 et 220000. La solution du modèle *MLT2* dans ce cas, est similaire à la solution du modèle *MLT0'* en termes de localisation des sites de production (sites de production en Chine et en Tunisie). Par contre, dans le modèle *MLT2*, le transport du produit fini fabriqué en Chine est assuré par le bateau contrairement à la solution du modèle *MLT0'* où le train est utilisé. L'utilisation du bateau dans le cas de *MLT2* conduit à la réduction de la quantité des émissions de carbone de 466 grammes à 280 grammes. L'attribut environnemental du produit fabriqué en Chine β_1 est égal à 0,39. Pour les produits finis fabriqués en Tunisie, l'approvisionnement en composant *P1* (tissu principal du jacket) se fait auprès du fournisseur tunisien (local dans ce cas), ce qui a permis de réduire les émissions liées au produit fini fabriqué en Tunisie de 378,7 grammes à 254,9 grammes (pour les composants *P2*, *P3* et *P4*, le fournisseur chinois est retenu). L'attribut environnemental du produit fabriqué en Tunisie β_2 est égal, dans ce cas à 0,45. L'attribut environnemental considéré pour le calcul de la demande est $\beta = \min(\beta_1, \beta_2) = 0,39$.
- Pour α variant de 30000 à 90000, les résultats sont identiques à la solution de $\alpha = 20000$.

- Pour $\alpha = 100000$, la demande varie entre 200000 et 300000. Le modèle opte pour une solution où les fournisseurs et les sites de production sont géographiquement proches de la zone des clients. Le site situé en Tunisie est ouvert et les différents composants ($P1$, $P2$, $P3$ et $P4$) sont achetés auprès du fournisseur local (tunisien). Cela permet de réduire significativement les quantités des émissions de carbone (70,4 g au lieu de 254,9 g). L'attribut de la qualité environnementale β passe dans ce cas à 0,84 (au lieu de 0,48). Le deuxième site est situé en Pologne avec également des fournisseurs locaux. L'attribut environnemental dans ce cas est égal à 0,79. La qualité environnementale considérée est alors égale à 0,79.

Tableau 4.6. Résultats du MLT2

<i>Sensibilité du marché (α)</i>	<i>Solutions logistiques / quantité</i>	Emission carbone / β_j	β
10000	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → train → Italie 150000 pièces</p> <p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie 50000 pièces</p>	<p>466 grammes / 0</p> <p>378,7 grammes / 0,18</p>	0
20000	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p> <i>P1</i> : Fournisseur Tunisien (Sfax) → train <i>P2, P3, P4</i> : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau </p> <p>57940 pièces</p>	<p>280 grammes / 0,39</p> <p>254,9 grammes / 0,45</p>	0.39

<p>30000</p>	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p><i>P1</i> : Fournisseur Tunisien (Sfax) → train } → Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie</p> <p><i>P2, P3, P4</i> : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau }</p> <p>61974 pièces</p>	<p>280 grammes / 0,39</p> <p>254,9 grammes / 0,45</p>	<p>0.39</p>
<p>50000</p>	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p><i>P1</i> : Fournisseur Tunisien (Sfax) → train } → Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie</p> <p><i>P2, P3, P4</i> : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau }</p> <p>69957 pièces</p>	<p>280 g / 0,39</p> <p>254,9 grammes / 0,45</p>	<p>0.39</p>

<p>60000</p>	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p><i>P1</i> : Fournisseur Tunisien (Sfax) → train</p> <p><i>P2, P3, P4</i> : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau</p> <p>73948 pièces</p> <p>→ Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie</p>	<p>280 grammes / 0,39</p> <p>254,9 grammes / 0,45</p>	<p>0.39</p>
<p>70000</p>	<p>Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau → Chine (site de production à Pékin) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p><i>P1</i> : Fournisseur Tunisien (Sfax) → train</p> <p><i>P2, P3, P4</i> : Fournisseur Chinois (Shanghai) → bateau</p> <p>77940 pièces</p> <p>→ Tunisie (site de production à Sousse) → bateau → Italie</p>	<p>280 g / 0,39</p> <p>254,9 grammes / 0,45</p>	<p>0.39</p>
<p>100000</p>	<p>Fournisseur Tunisien (Sfax) → train → Tunisie (Site de production à Sousse) → bateau → Italie 150000 pièces</p> <p>Fournisseur Polonais (Plock) → bateau → Pologne (Site de production à Gdynia) → bateau → Italie 129109 pièces</p>	<p>70,4 grammes / 0,84</p> <p>97,35 grammes / 0,79</p>	<p>0.79</p>

Dans les figures 4.6 et 4.7, nous présentons respectivement, la qualité environnementale des produits et le gain en fonction de la sensibilité du marché.

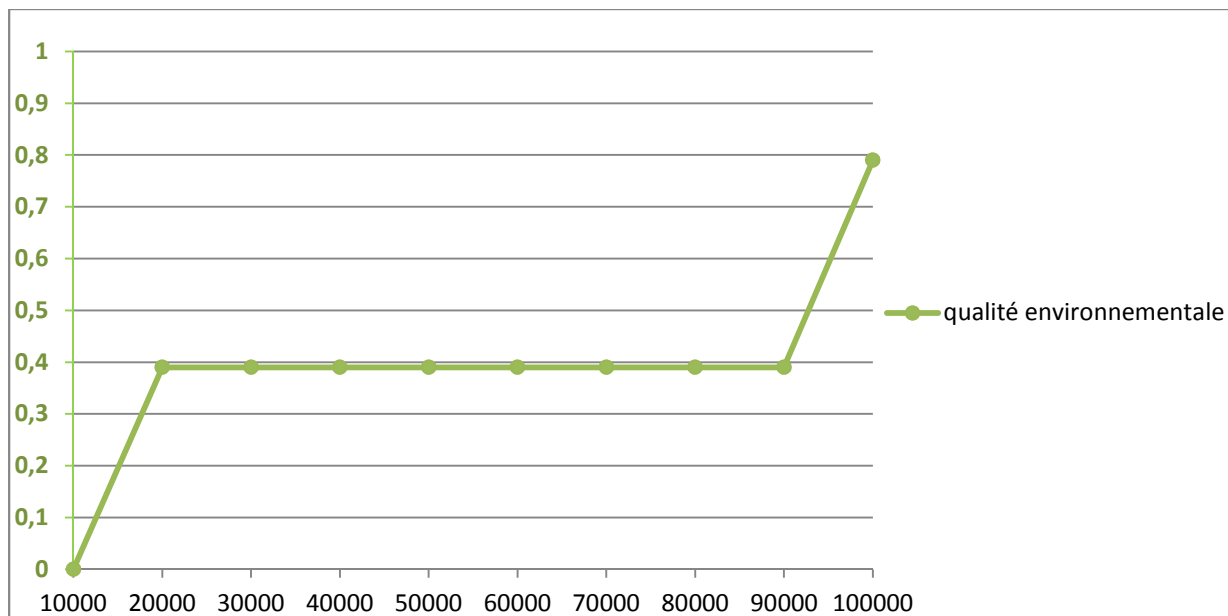


Figure 4.6. Impact de la variation de la sensibilité du marché (α) sur la qualité environnementale des produits

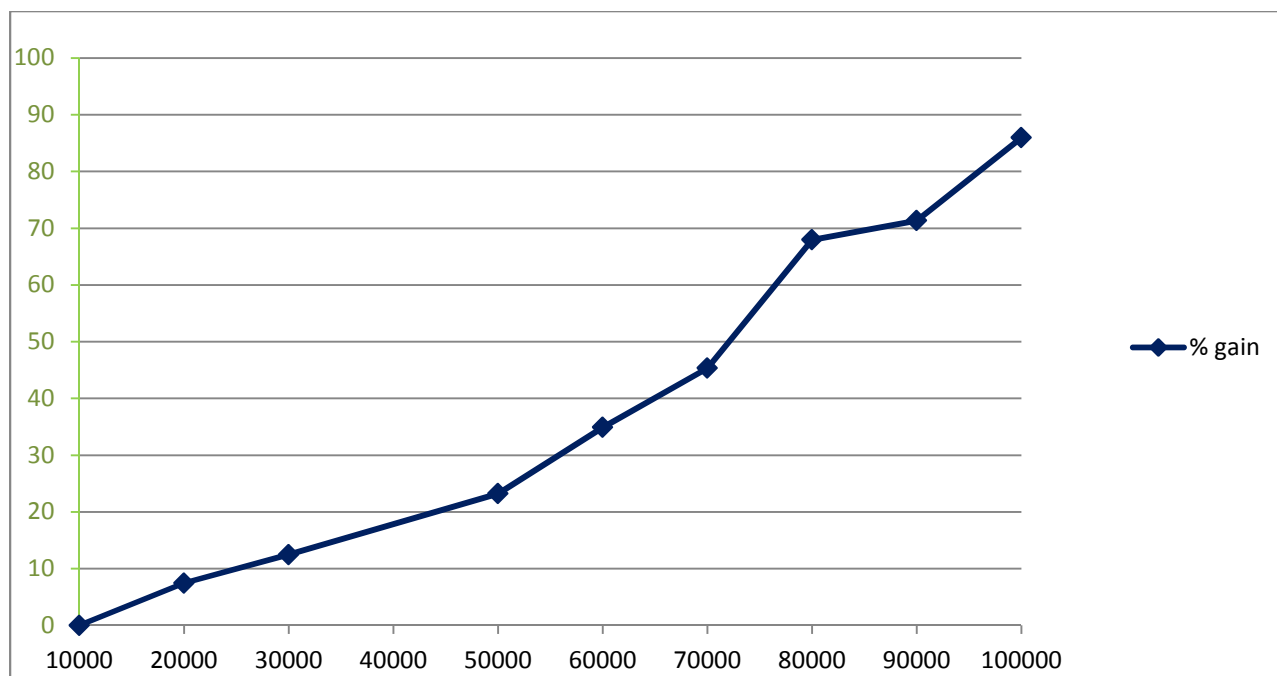


Figure 4.7. Impact de la variation de la sensibilité du marché (α) sur le gain (g)

Nous observons sur les figures 4.6 et 4.7 que la qualité environnementale des produits finis et le pourcentage de gain (g) de l'entreprise (par rapport au cas où la qualité environnementale n'est pas prise en compte) augmentent en fonction de la sensibilité du marché.

Nous n'avons pas tracé, ici les courbes des coûts. Mais ces dernières ont la même tendance que pour le cas du modèle *MLTI*, c'est-à-dire que les coûts par unité de produit fini augmentent lorsque le modèle opte pour des solutions logistiques proches géographiquement. Cette augmentation des coûts est compensée par la croissance des revenus suite à la croissance de la demande (grâce à la diminution de la quantité des émissions de carbone et par conséquent, l'amélioration de la qualité environnementale des produits).

Pour la variation des quantités des émissions de carbone, les résultats sont similaires aux résultats de *MLTI* avec capacité infinie.

En résumé, nous concluons de ces expérimentations que la considération de la qualité environnementale des produits lors de l'optimisation des décisions de conception des chaînes logistiques permet d'améliorer les performances économiques de l'entreprise en augmentant ses revenus et de gagner des parts du marché vert suite à l'amélioration de la qualité environnementale des produits. Les performances environnementales de l'entreprise sont également améliorées suite au choix des fournisseurs et des sites de production proches et par conséquent la diminution des quantités des émissions de carbone dégagées.

Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle de sélection des fournisseurs, de localisation des sites de production et de choix de modes de transport, dans lequel la demande dépend du niveau de la qualité environnementale du produit fini et dans lequel la qualité environnementale est mesurée à partir des décisions logistiques. Nous avons effectué des expérimentations afin d'évaluer l'impact de l'intégration de la qualité environnementale des produits sur les performances économiques et environnementales de l'entreprise. Nous avons montré que les avantages qui découlent de l'intégration de la qualité environnementale des produits dans les modèles de conception des chaînes logistiques, peuvent être très importants. Les modèles présentés dans ce chapitre peuvent être considérés comme une première tentative de développement de modèles qui abordent d'une part la relation entre les décisions de conception de la chaîne logistique et la qualité environnementale des produits et d'autre part la relation entre la demande et la qualité environnementale du produit fini. Dans ce chapitre

nous avons considéré le cas de mass marketing puisqu'un seul produit fini est offert aux différents clients (ordinaires et verts). Dans le chapitre suivant, nous considérons en plus du cas de mass marketing, le cas de segmentation de marché. Nous intégrons également les réglementations environnementales et nous considérons d'autres types de décisions logistiques.

**Chapitre V : Modélisation de l'impact des décisions logistiques sur la qualité
environnementale des produits : problématique de choix des technologies de production
et des fournisseurs avec prise en compte des législations environnementales**

Introduction

Dans le chapitre 4, nous nous sommes intéressés à la relation entre les décisions de sélection des fournisseurs, localisation des sites et de sélection des modes de transport et la qualité environnementale du produit. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur d'autres décisions de la chaîne logistique à savoir les décisions de choix de technologies de production et de sélection des composants. Nous considérons également dans ce chapitre, les législations environnementales liées aux émissions polluantes. A travers une étude expérimentale, nous étudions l'impact de ces législations sur la qualité environnementale des produits fabriqués ainsi que sur les performances économiques et environnementales de l'entreprise.

En plus de la stratégie de mass marketing, étudiée dans le chapitre précédent, nous étudions ici, le cas de segmentation du marché où l'entreprise décide d'offrir une variété spécifique du produit fini pour chaque segment.

Nous développons alors, deux modèles d'optimisation de la chaîne logistique qui s'intéressent à la sélection des processus de production et au choix des composants et dans lesquels les législations environnementales sont intégrées. La différence entre les deux modèles présentés consiste principalement dans la modélisation de la demande. En effet, comme discuté dans le chapitre 2, selon la connaissance de l'entreprise pour la structure du marché, deux stratégies peuvent être adoptées. Dans le premier modèle, un seul produit est offert et la demande de ce produit dépend de sa qualité environnementale (ce qui correspond à la stratégie de mass marketing). Dans le deuxième modèle, le marché est segmenté entre des clients ordinaires et des clients verts. L'entreprise décide d'offrir une variété différente du produit fini pour chacun des deux segments (stratégie de segmentation du marché). Dans ce cas, la demande mais aussi le prix sont endogènes et dépendent de la qualité environnementale du produit fini. Dans les deux modèles, la qualité environnementale des produits finis est une variable de décision qui est déterminée simultanément avec les autres décisions du modèle. L'objectif des deux modèles est de maximiser les profits de l'entreprise sous des contraintes environnementales.

5.1 Présentation de la problématique

Comme dans le chapitre précédent, nous considérons une entreprise qui opère dans un marché où la demande des produits finis dépend de leurs niveaux de qualité environnementale.

Nous considérons le produit fini jacket pour femmes déjà décrit dans les chapitres précédents. Ce produit fini peut être fabriqué par quatre processus de production différents. Ces processus diffèrent par le type et les quantités des émissions dégagées. Les composants qui constituent la jacket peuvent être des composants verts ou des composants ordinaires.

Selon la stratégie de l'entreprise, deux approches différentes pour la modélisation du marché peuvent être considérées. La première approche de mass marketing étudiée dans le chapitre précédent consiste à offrir une seule variété de ce produit fini pour les clients ordinaires et les clients verts. Cette variété est vendue à un prix fixe (paramètre d'entrée) pour les deux types de clients. Nous notons le modèle correspondant par *MPC1 (Modèle de choix de Procédés de production et de choix de Composants version 1)*.

Dans la deuxième approche, nous considérons que l'entreprise offre une variété du produit fini spécifique pour chaque segment du marché : une variété ordinaire pour les clients ordinaires et une variété verte pour les clients verts. Nous notons le modèle correspondant par *MPC2*. Nous rappelons que dans ce cas, les deux variétés du produit fini seront vendues à des prix différents. La demande et le prix de la variété offerte au segment vert dépend de sa qualité environnementale qui est mesurée en fonction de deux attributs environnementaux notés λ et ψ . Rappelons que le premier attribut λ , déjà défini dans le chapitre 2, correspond au taux de réduction des émissions polluantes dégagées par le processus de production sélectionné comparé au niveau maximum des émissions du processus de production le plus polluant (parmi les processus potentiels). Le deuxième attribut ψ représente le taux des composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini. La sélection des processus de production et des composants conduisent ainsi, à la détermination de la qualité environnementale du produit fini et par conséquent, sa demande et son prix de vente.

Nous considérons dans ce travail, différents types d'émissions qui peuvent être soumis à des réglementations environnementales. Les lois environnementales que nous modélisons sont de trois types :

- Des pénalités : législations fondées sur le principe du «pollueur-payeur» où le pollueur doit supporter des pénalités qui sont basées sur les quantités des émissions dégagées.

- Des valeurs seuils : des valeurs limites supérieures qui ne peuvent pas être violées, en d'autres termes, en aucun cas, l'entreprise ne peut dépasser la quantité tolérée (imposée par le gouvernement) en termes d'émission dégagée.
- Des Permissions d'Emissions Négociables (PEN) : contrairement aux autres législations, citées ci-dessus, la politique des PEN, donne plus de flexibilité aux entreprises dans le sens où, même si certaines émissions sont soumises à des valeurs seuils, les entreprises peuvent acheter des permissions à polluer (quand elles dépassent la valeur limite). Les entreprises qui polluent moins que les valeurs seuils peuvent alors vendre leurs permissions d'émission. Cela peut être considéré comme une incitation financière de la part du gouvernement pour les entreprises «propres».

Lorsque les questions environnementales représentent la préoccupation majeure dans le développement des modèles de conception de chaînes logistiques, il n'est pas pertinent de considérer une fonction objectif qui minimise les coûts, comme il est le cas dans de nombreux modèles logistiques existants dans la littérature d'optimisation de la chaîne logistique. Nous considérons plutôt une fonction de maximisation du profit dans laquelle les incitations environnementales sont incluses. L'objectif de notre modèle est alors de maximiser le profit de l'entreprise qui est la différence entre les revenus et les coûts. Les revenus sont générés par la vente du produit fini (aux clients ordinaires et aux clients verts) et la vente des permissions d'émission négociables. Les coûts se rapportent aux coûts d'achat des composants, aux coûts fixes du processus de production, aux coûts variables de production, aux pénalités environnementales qui sont payées en cas de violation de la réglementation environnementale, et aux coûts d'achat des permissions d'émissions négociables.

Offrir des produits verts peut augmenter la demande et les revenus de l'entreprise. En plus, ceci permet de se conformer aux législations et de diminuer ainsi les coûts environnementaux. Toutefois, ceci nécessite dans notre cas, l'utilisation de composants verts et de processus de production verts, ce qui peut augmenter les coûts de production. En effet, les coûts des composants verts et des processus de production verts peuvent être plus élevés comme indiqué par [Chen \(2001\)](#). Les décisions de sélection des processus de production et de choix de composants sont très corrélées avec le niveau de qualité environnementale des produits

fabriqués. Les modèles proposés dans les sections suivantes aident à considérer et analyser ce type de corrélation.

5.2 Formulation du problème *MPCI* : stratégie de mass marketing

Nous rappelons que dans ce modèle, l'entreprise offre un seul produit fini, à un prix fixe donné, pour les clients ordinaires et les clients verts. Nous rappelons que les principales décisions du modèle sont le choix de processus de production et le choix des types de composants (verts ou ordinaires). Pour simplifier la définition des attributs environnementaux, nous supposons qu'un seul processus de production peut être sélectionné et qu'une seule variété (vert ou ordinaire) peut être choisie par composant.

Le modèle est un programme mixte en nombres entiers.

5.2.1 Notations

Tout d'abord, nous introduisons les notations qui seront utilisées pour la formulation mathématique du problème *MPCI*.

Paramètres :

- F : nombre de processus potentiels de production,
- R : nombre de composants nécessaires par unité de produit fini,
- M : nombre total de types d'émissions,
- N : nombre des émissions polluantes soumises à des pénalités et/ou des valeurs seuils ($N \leq M$),
- C_f : coût unitaire de production en utilisant le processus f ,
- K_f : coût fixe du processus de production f ,
- S : prix unitaire de vente du produit fini,
- \bar{D} : demande de base des clients ordinaires,
- P_r^T : prix unitaire d'achat du composant r si r est ordinaire,
- P_r^G : prix unitaire d'achat du composant r si r est vert,
- δ_r : quantité du composant r nécessaire par unité de produit fini (selon la nomenclature),
- Q_m : pénalité unitaire pour l'émission m ($m=1, \dots, N$). Si l'émission m n'est pas soumise à une pénalité alors $Q_m = 0$,
- E_m : niveau maximum autorisé (valeur seuil) pour l'émission m (pour m donné, $m=1, \dots, N$),

- E_m^T : nombre maximum de permissions d'émissions négociables, alloué aux entreprises pour l'émission polluante m ($m=N+1, \dots, M$),
- Q_m^+ : prix unitaire d'achat des permissions d'émissions négociables pour l'émission m (si m est soumise à des permissions négociables : $m=N+1, \dots, M$),
- Q_m^- : prix unitaire de vente des permissions d'émissions négociables pour l'émission m (si m est soumise à des permissions d'émissions négociables : $Q_m^- \leq Q_m^+$),
- ε_{mf} : quantité de l'émission m ($m=1, \dots, M$) dégagée par le processus f pour la fabrication d'une unité de produit fini,
- ε_{max} : quantité totale d'émissions dégagées pour la fabrication d'une unité de produit fini en utilisant le processus de production le plus utilisé dans le secteur de textile lorsque la qualité environnementale des produits n'est pas considérée (situation de référence).

Variables de décision:

Les principales variables de décision de notre modèle sont les suivantes :

- z_f : égale à 1 si le processus de production f est utilisé, 0 sinon ($f=1 \dots F$).
- v_r : égale à 1 si le composant utilisé r est vert, 0 s'il est ordinaire ($r=1 \dots R$).
- x_f : quantité du produit fini, fabriquée en utilisant le processus de production f , ($f=1 \dots F$).
- λ : attribut de la qualité environnementale lié aux émissions du processus de production utilisé.
- ψ : attribut de la qualité environnementale lié à la composition du produit fini (en termes de composants verts).

Pour modéliser la politique de l'entreprise vis-à-vis des législations environnementales, nous introduisons les variables de décision suivantes :

- e_m : quantité totale dégagée de l'émission polluante m ($m=1, \dots, M$),
- e_m^+ : nombres de permissions d'émissions négociables, achetées pour l'émission négociable m ($m=N+1, \dots, M$),
- e_m^- : nombres de permissions d'émissions négociables, vendues de l'émission négociable m ($m = N + 1, \dots, M$),

Le modèle que nous développons inclut d'autres paramètres et variables de décision que nous introduisons lors de la présentation des contraintes du modèle.

5.2.2 Fonction objectif

L'objectif du modèle est de maximiser le profit de l'entreprise qui est exprimé comme la différence entre les revenus (vente du produit fini pour les différents types de clients + gain obtenu par la vente des permissions d'émissions négociables) et les coûts (coûts d'achat des composants + coûts de production + pénalités environnementales + coûts d'achat des PEN).

La fonction objectif peut alors être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max} \left(S \sum_{f=1}^F x_f - \sum_{f=1}^F C_f x_f - \sum_{f=1}^F K_f z_f - \sum_{r=1}^R P_r^T \sum_{f=1}^F x_f (1 - v_r) \delta_r - \sum_{r=1}^R P_r^G \sum_{f=1}^F x_f v_r \delta_r - \sum_{m=1}^N Q_m e_m \right. \\ \left. + \sum_{m=N+1}^M Q_m^- e_m^- - \sum_{m=N+1}^M Q_m^+ e_m^+ \right) \end{aligned}$$

La fonction objectif est non linéaire. La non-linéarité est due au produit d'une variable binaire et d'une variable non-négative bornée qui apparaît dans le terme $\sum_{f=1}^F x_f v_r$. Ce type de non-linéarité est connu dans la littérature et peut être linéarisé en introduisant de nouvelles variables et un ensemble de contraintes linéaires. Nous avons suivi la méthode de linéarisation présentée dans [Billionet \(2007\)](#).

5.2.3 Les contraintes du modèle

Nous présentons maintenant, les contraintes du modèle.

Les contraintes exprimant la qualité environnementale du produit :

Comme mentionné précédemment, la qualité environnementale des produits peut être exprimée en fonction de deux attributs. Le premier attribut, λ , représente la quantité de réduction des émissions qui peut être obtenue en utilisant le processus de production sélectionné. Le deuxième attribut, ψ , représente le taux des composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini. Ce taux dépend de l'importance relative des composants verts utilisés pour la fabrication du produit fini.

La contrainte suivante représente l'expression du premier attribut de la qualité environnementale λ .

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

Avec ε_{\max} le niveau maximal des émissions dégagées si le processus de production le plus polluant (parmi les processus potentiels) est utilisé et $\varepsilon = \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M \tau_m \varepsilon_{mf} z_f$ avec ε_{mf} la quantité de l'émission m dégagée par le processus f pour la production d'une unité de produit fini, τ_m le paramètre de pondération de l'émission m en fonction de sa dangerosité et nuisibilité à l'environnement et z_f une variable binaire qui est égale à 1 si le processus f est sélectionné, 0 sinon.

L'attribut de la qualité environnementale relatif au taux des composants verts, est représenté par l'expression suivante :

$$\psi = \sum_{r=1}^R \mu_r v_r, \quad (2)$$

Avec μ_r le paramètre qui représente l'importance du composant r en termes de son impact environnemental (avec $\sum_{r=1}^R \mu_r = 1$). Nous rappelons que des détails sur la signification de ce paramètre ont été donnés dans le chapitre 2.

La valeur de chacun des deux attributs environnementaux varie entre 0 et 1. Le niveau de la qualité environnementale est calculé sous la forme de la somme des deux attributs ($\lambda + \psi$). Si la qualité environnementale est à son niveau minimal, le produit ne contient pas de composants verts et le processus de production utilisé est le plus polluant parmi les processus potentiels considérés. Plus la valeur de la qualité environnementale est proche de 2, plus le produit est vert.

Les contraintes exprimant les législations environnementales :

Nous modélisons dans ce travail trois types de législations environnementales relatives à la limitation des émissions polluantes:

- des seuils qui ne peuvent pas être dépassés pour certaines émissions,
- des pénalités calculées sur la base de la quantité dégagée pour certaines émissions,
- des permissions d'émissions négociables pour certains types d'émissions, avec une différence dans les coûts de transactions pour l'achat et la vente de ces permissions (prix d'achat : Q_m^+ > prix de vente : Q_m^-).

Tout d'abord, nous déterminons la quantité totale de chaque émission m , résultant de la production de la quantité totale du produit fini.

$$e_m = \left(\sum_{f=1}^F \varepsilon_{mf} x_f \right) \quad \text{pour } m = 1 \dots M \quad (3)$$

La valeur seuil est une borne supérieure qui limite la quantité totale dégagée pour chaque émission m soumise à une législation de type seuil limite. La contrainte est exprimée comme suit :

$$e_m \leq E_m \quad \text{pour } m \text{ donné} \quad (4)$$

Nous considérons deux variables, e_m^- et e_m^+ , pour représenter respectivement, la quantité des PEN vendue et la quantité achetée. La différence entre la quantité totale des émissions dégagées et les permissions d'émissions négociables échangées (permissions vendues et achetées) est régulée par la quantité des PEN alloués par les gouvernements (E_m^T). La contrainte suivante exprime la limite allouée pour l'échange des PEN.

$$e_m + e_m^- - e_m^+ = E_m^T \quad \text{pour } m = N+1 \dots M \quad (5)$$

Les contraintes exprimant la demande :

La fonction de la demande inclut explicitement la qualité environnementale du produit ($\lambda + \psi$), avec un coefficient positif pour représenter la relation entre la demande et la qualité environnementale du produit. La demande est alors donnée par l'expression suivante :

$$d = \bar{D} + \alpha * (\lambda + \psi) \quad (6)$$

Avec α le coefficient qui représente la sensibilité du marché pour la qualité environnementale du produit. Rappelons que \bar{D} est la demande ordinaire.

Dans ce qui suit, nous exprimons la contrainte limitant la quantité totale fabriquée :

$$\sum_{f=1}^F x_f \leq d \quad (7)$$

Les contraintes logistiques :

Dans notre modèle, afin de pouvoir simplifier le calcul de l'attribut environnemental λ , un seul processus de production peut être sélectionné pour la fabrication du produit fini.

$$\sum_{f=1}^F z_f = 1 \quad (8)$$

La contrainte suivante exprime la relation entre la quantité fabriquée du produit fini (variable continue x_f) et le processus de production sélectionné (variable binaire z_f). Si le processus de production f n'est pas sélectionné ($z_f = 0$) alors $x_f = 0$.

$$\frac{1}{M} z_f \leq x_f \leq M z_f \quad (M \text{ est une constante suffisamment grande}) \quad (9)$$

Finalement, nous présentons les contraintes de non-négativité et d'intégrité :

$$\lambda, \psi, e_m, e_m^-, e_m^+, x_f \geq 0 \quad (10)$$

$$z_f, v_r \in \{0, 1\} \quad (11)$$

5.3 Expérimentations du modèle MPC1

L'objectif principal de ces expérimentations est d'étudier comment la prise en compte de la qualité environnementale du produit impacte les décisions de sélection de processus de production et de choix de composants. Nous montrons également les avantages économiques de l'intégration de la qualité environnementale du produit dans les modèles d'optimisation des activités de la chaîne logistique. Nous présentons tout d'abord, les données que nous utilisons pour ces expérimentations. Ces données sont extraites de l'étude du cas de textile présenté dans le chapitre 3.

5.3.1 Présentation des données :

Dans ce travail, nous distinguons quatre processus potentiels de production qui diffèrent par les types et les quantités des émissions. Ces processus vont du plus ordinaire (Processus 1) au plus vert (Processus 4). Le tableau 5.1 présente les types et les quantités des émissions dégagées par chacun des processus potentiels considérés (ε_{mf} : quantité de l'émission m

dégagée pour la fabrication d'une unité de produit fini en utilisant le processus de production f). Dans cet exemple, nous considérons le même niveau de pondération τ_m pour les différents types des émissions considérés.

Tableau 5.1. Emissions dégagées par chacun des processus potentiels de production

Vers le processus le moins polluant ↓	Types d'émissions	CCO–Cr (m=1) mg/l	CBO5 (m=2) mg/l	Détergent biodégradable (m=3) mg/l
	Processus 1	2.0	0.11	1.3
	Processus 2	1.6	0.11	1.1
	Processus 3	1.0	0.09	0.6
	Processus 4	0.4	0.10	0.3

Le processus de production (*Processus 4*) est le plus propre, il correspond à l'application de la technologie AirDye (Colorep) décrite dans chapitre 3. En effet, il représente le niveau minimum des émissions dégagées ε_f (pour un processus donné f , $\varepsilon_f = \sum_{m=1}^M \tau_m \varepsilon_{mf}$). Le premier processus de production (*Processus 1*) est le plus polluant. Nous considérons que plus le processus de production est propre, plus son coût est élevé (Letmathe et Balakrishnan, 2005 ; Radelescu et al., 2010). La valeur de ε_{max} correspond aux émissions du processus le plus utilisé. Dans notre cas ceci correspond au processus le plus polluant car il est également le processus le moins couteux ($\varepsilon_{max} = \varepsilon_1 = \sum_{m=1}^M \varepsilon_{m1} = 3.41$).

Le choix entre une variété verte et une variété ordinaire est possible uniquement pour deux composants du produit fini (parmi les quatre décrits dans le chapitre 3). Dans cet exemple nous considérons seulement ces deux composants, et qui sont respectivement le tissu principal de la jacket et les colorants. Nous les notons respectivement $P1$ et $P2$. Comme décrit dans le chapitre 3 (Tableau 3.1), pour le tissu principal ($P1$), l'entreprise peut utiliser un tissu à base de laine naturelle issu de l'agriculture biologique ou bien du tissu synthétique (25% de laine mélangé avec du polyester à base de fibres pétrochimiques). Il existe également deux types de colorants ($P2$) à savoir des colorants chimiques et des colorants naturels à base de pigments des plantes. Le tableau 5.2 résume les différentes données nécessaires pour l'étude expérimentale.

Tableau 5.2. Paramètres et coûts du modèle

Demande de base (\bar{D}) : 1000
Sensibilité du marché (α) : 300
Nombre de processus de production, composants d'entrée, émissions soumises à des pénalités et émissions soumises à des PEN = 4, 2, 3 et 1, respectivement.
Pénalités des Emissions (Q_m) : $Q_1=Q_2=Q_3=10$
Valeurs seuils (E_m) : $E_1 = 3500, E_2 = 2350, E_3 = 1750$
Quantité du composant r nécessaire par unité de produit fini (δ_r): $\delta_1=1, \delta_2=2,$
Coût unitaire d'achat pour les composants verts (P_r^G) : $P_1^G=20, P_2^G=10,$
Coût unitaire d'achat pour les composants ordinaires : (P_r^T) : $P_1^T=15, P_2^T=5,$
Coûts fixes des processus de production (K_f) : $K_1=4500, K_2=5500, K_3=6500, K_4=8500$
Coût unitaire de production (C_f) : $C_1=20, C_2=23, C_3=28, C_4=38$
Prix unitaire de vente du produit fini (S) : 100

5.3.2 Démarche expérimentale et Résultats

A travers ces expérimentations, nous cherchons principalement à évaluer l'impact de l'intégration de la qualité environnementale dans le modèle proposé *MPCI* sur les décisions logistiques et le profit de l'entreprise. Pour ce faire, nous proposons un modèle équivalent au modèle *MPCI* mais dans lequel la qualité environnementale des produits n'est pas intégrée. Nous notons ce modèle *MPC0*. A l'exception de l'intégration des attributs de la qualité environnementale des produits et leurs corrélations avec la demande, les deux modèles reposent sur les mêmes hypothèses. Ainsi, la différence majeure entre ces deux modèles concerne la modélisation de la demande. Etant donné que la qualité environnementale des produits n'est pas intégrée dans *MPC0*, alors la demande dans ce cas est considérée comme un paramètre donné (constante d'entrée). Ceci signifie que bien que la demande du marché dépende de la qualité environnementale du produit, l'entreprise ne tient pas compte de cette relation lorsqu'il s'agit de la sélection des processus de production et du choix des composants d'entrée.

Pour cette expérimentation, nous définissons deux scénarios qui reflètent deux niveaux différents de la compréhension de l'entreprise de la relation entre la demande et la qualité environnementale des produits.

Le premier scénario correspond à la situation où l'entreprise connaît la structure du marché et elle est consciente de la nature endogène de la demande qui dépend de la qualité environnementale du produit. Dans ce cas, l'entreprise intègre la qualité environnementale des produits dans les modèles d'optimisation de sa chaîne logistique. Ce scénario est décrit par le modèle *MPCI*.

Le deuxième scénario correspond à la situation où l'entreprise ignore la relation entre la demande et la qualité environnementale du produit. Elle s'intéresse alors uniquement à la demande des clients ordinaires (demande de base \bar{D}). Les décisions et le gain, relatifs à ce scénario, sont obtenus par la résolution du modèle *MPC0*. Dans ce scénario, on optimise en fonction des contraintes économiques puisque nous n'intégrons pas la qualité environnementale des produits. Toutefois, à cause des réglementations environnementales, le modèle peut ne pas choisir le processus de production le plus polluant (processus de référence pour définir ε_{max}). Ainsi, le produit élaboré dans ce cas peut avoir une performance environnementale non nulle. Nous considérons que l'entreprise adapte sa production à la vraie demande du marché qui dépend de la qualité environnementale du produit élaboré.

Pour étudier l'impact économique de l'intégration de la qualité environnementale des produits dans les modèles d'optimisation de la chaîne logistique, nous comparons les profits du premier et du deuxième scénario.

Notre approche expérimentale est détaillée à travers les étapes suivantes:

- Tout d'abord, nous résolvons le modèle *MPC1* avec le logiciel d'optimisation Cplex. Rappelons que la demande est exprimée en fonction de la qualité environnementale du produit ($d = \bar{D} + \alpha * (\lambda + \psi)$) ; la sensibilité du marché pour la qualité environnementale du produit est égale à $\alpha = 300$, et la demande ordinaire $\bar{D} = 1000$. Cela signifie que lorsque la demande du marché dépend de la qualité environnementale du produit, la demande totale (des clients ordinaires et verts) peut varier entre 1000 (lorsque $\lambda + \psi = 0$) et 1600 (lorsque $\lambda + \psi = 2$). Nous obtenons le profit optimal de l'entreprise que nous notons G_I .
- En second lieu, nous résolvons le modèle *MPC0* qui n'intègre pas la qualité environnementale du produit. Pour l'optimisation, nous considérons le cas où la demande est égale à la demande des clients ordinaires ($\bar{D} = 1000$). Les décisions du modèle qui correspondent à ce cas sont les suivantes : le tissu choisi est à base de tissu synthétique et les colorants sont chimiques. Ainsi, tous les composants sélectionnés sont ordinaires ($v_1 = v_2 = 0$) et le processus de production sélectionné est le *Processus 3*.
- Rappelons que nous considérons que l'entreprise peut adapter sa production selon la vraie demande du marché qui est en fonction des attributs du produit élaboré. Nous calculons

alors les attributs de la qualité environnementale qui correspondent à la solution de *MPC0*. Nous les désignons par λ^0 et ψ^0 (avec $\lambda^0 = 0,5$ et $\psi^0 = 0$). Comme nous l'avons expliqué avant, étant donné les contraintes relatives aux réglementations environnementales, la valeur de l'attribut environnemental lié aux émissions du procédé de production est différente de 0. Nous calculons ensuite, la demande d^* qui correspond à la valeur de la demande lorsque les attributs environnementaux sont égaux à λ^0 et ψ^0 . C'est à dire, $d^* = \bar{D} + \alpha * (\lambda^0 + \psi^0)$. Nous obtenons $d^* = 1150$.

- Ensuite, nous calculons une deuxième fois la fonction objectif du modèle *MPC0* en utilisant la valeur de la demande d^* au lieu de la demande initiale \bar{D} . Nous obtenons le profit optimal correspondant noté par G_0 .
- Finalement, nous comparons G_1 à G_0 . Nous définissons le pourcentage de gain g , qui résulte de l'utilisation du modèle intégré *MPC1* au lieu de *MPC0*, comme suit : $g = \frac{(G_1 - G_0) * 100}{G_0}$. En d'autres termes, g représente le gain relatif qu'une entreprise peut réaliser si elle considère la qualité environnementale des produits dans les modèles d'optimisation de ses décisions logistiques, par rapport au cas où la qualité environnementale des produits n'est pas intégrée.

Remarque : Les lecteurs peuvent remarquer que nous n'avons pas considéré la même démarche expérimentale que dans le chapitre précédent. Nous rappelons que la référence de mesure de l'attribut environnemental lié aux émissions de transport est déterminée à partir du modèle de base *MLT0* (qui n'intègre pas la qualité environnementale du produit). Ainsi la valeur de l'attribut environnemental lié à *MLT0* est par construction nulle et par la suite la demande reste égale à \bar{D} .

Nous résumons ci-après les résultats obtenus :

- Le pourcentage de gain g est égal à 3%. Ainsi, si l'entreprise considère la qualité environnementale des produits lors de l'optimisation de ses activités de production et d'approvisionnement, alors elle peut augmenter son profit de 3%. Ce gain prouve la pertinence du modèle proposé *MPC1* et justifie sa recommandation pour les entreprises.

- Les décisions de sélection de processus de production du modèle *MPC1* sont différentes de celles du modèle *MPC0*. En effet, avec *MPC0*, le *Processus 3* est sélectionné alors que dans le cas de *MPC1*, le processus le plus écologique (*Processus 4*) est choisi. Cela montre que les entreprises qui n'intègrent pas la qualité environnementale des produits risquent de ne pas prendre les décisions logistiques adéquates.
- La quantité des émissions dégagées, dans le cas de *MPC0* est supérieure à la quantité des émissions générées dans *MPC1*. Ce résultat est expliqué par la sélection d'un processus de production plus propre dans *MPC1*. Notez que le coût élevé du processus de production écologique (*Processus 4*) est compensé par la réduction des pénalités et l'augmentation des revenus.

Nous développons les expérimentations en testant différentes instances dans lesquels nous considérons différentes valeurs de α et nous faisons varier le prix de vente du produit. Les résultats sont présentés dans la figure 5.1.

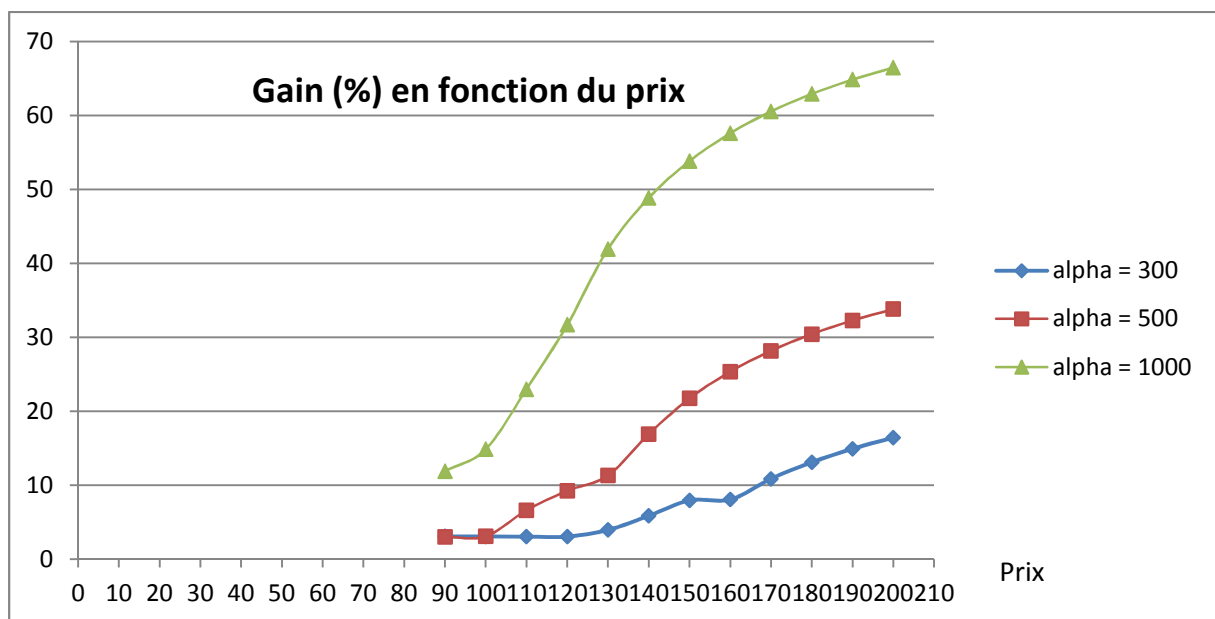


Figure 5.1. Evolution du Gain (g) en fonction de la variation du prix de vente et pour différentes valeurs de la sensibilité du marché

En observant la figure 5.1, nous déduisons les résultats suivants :

- Quelque soit la valeur de α , il n'est pas rentable de fabriquer des produits pour des prix de vente inférieurs à 80 (dans les deux cas *MPC1* et *MPC0*), les coûts sont supérieurs aux prix de vente.

- A partir d'une valeur donnée du prix de vente (90), le gain prend des valeurs positives et plus le prix est élevé, plus le gain devient important. En effet, l'entreprise peut fabriquer des produits avec un niveau élevé de qualité environnementale en sélectionnant le processus de production le plus propre et en achetant des composants verts (tissu en laine biologique et teinture à base de pigments naturels). L'entreprise attire ainsi plus de clients verts et augmente ses ventes dans le cas où elle intègre la qualité environnementale dans son modèle d'optimisation (*MPC1*). Cette opportunité n'est pas considérée dans le cas où l'entreprise ignore la relation entre la qualité environnementale des produits élaborés et les décisions de choix de processus de production et des composants (*MPC0*). En plus, nous soulignons que le gain peut s'expliquer également par la diminution des pénalités payées suite à la diminution de la quantité des émissions dégagées (grâce à la sélection du processus de production le plus vert).
- Pour un prix de vente donné, plus la sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit est grande, plus le gain devient important. En outre, plus la sensibilité du marché à la qualité environnementale est grande, plus le gain croît rapidement avec l'augmentation du prix de vente. Cela prouve que les entreprises doivent intégrer la qualité environnementale des produits dans l'optimisation des activités de leurs chaînes logistiques.

Nous avons illustré le grand impact de la prise en compte de la qualité environnementale des produits sur les décisions de sélection des processus de production et de choix de composants, et sur le profit de l'entreprise. En plus, nous avons montré expérimentalement que les décisions de la chaîne logistique dépendent fortement du prix de vente du produit fini. Dans la section suivante et dans le cadre de la stratégie de segmentation du marché, nous étudions l'impact de la variation du prix de vente du produit fini en fonction de la qualité environnementale, sur les décisions de la chaîne logistique et le profit de l'entreprise.

5.4 Stratégie de segmentation du marché : présentation du modèle *MPC2*

Dans cette section, nous étendons le premier modèle *MPC1* pour considérer le cas où le marché est segmenté en des clients ordinaires et des clients verts et où l'entreprise choisit d'offrir une variété différente du produit fini pour chaque segment du marché. Les deux

variétés du produit sont proposées à des prix de vente différents. Il est important de noter que nous considérons que seul le prix de vente du produit offert au segment vert dépend du niveau de sa qualité environnementale.

Dans ce qui suit, nous désignons la variété offerte pour le segment vert par “produit vert” par opposition au “produit ordinaire” qui désigne la variété offerte au segment ordinaire.

Afin de développer la formulation du nouveau modèle *MPC2*, nous mettons à jour la définition de certains paramètres du modèle précédent et nous définissons certaines nouvelles variables de décision décrites ci-dessous.

5.4.1 Notations :

Variables de décision

Nous utilisons les indices o et g pour désigner respectivement les variables de décisions liées aux produits ordinaires et celles liées aux produits verts. Nous présentons ci-après, les principales variables de décisions (en décrivant celles qui sont différentes par rapport à la formulation du modèle *MPC1*).

- z_f^o : égale à 1 si le processus de production f est sélectionné pour la fabrication du produit ordinaire, 0 sinon.
- z_f^g : égale à 1 si le processus de production f est sélectionné pour la fabrication du produit vert, 0 sinon.
- v_r^o : égale à 1 si le composant r utilisé pour la fabrication du produit ordinaire, est vert, 0 sinon (r est ordinaire).
- v_r^g : égale à 1 si le composant r utilisé pour la fabrication du produit vert, est vert, 0 sinon (r est ordinaire).
- λ^o : attribut environnemental du *produit ordinaire*, lié aux émissions du processus de production utilisé.
- λ^g : attribut environnemental du *produit vert*, lié aux émissions du processus de production utilisé.
- ψ^o : attribut environnemental lié à la composition du *produit ordinaire*.
- ψ^g : attribut environnemental lié à la composition du *produit vert*.
- x_f^o : quantité du produit ordinaire fabriquée par le processus de production f .
- x_f^g : quantité du produit vert fabriquée par le processus de production f .
- s^g : prix unitaire de vente du produit vert.

- d^g : demande du segment vert du marché.

Paramètres du modèle :

- S^o : prix unitaire de vente du produit ordinaire.
- D^o : demande du segment ordinaire du marché.
- D_{max}^g : demande maximale du segment vert. Cette demande correspond à la demande du segment vert si la qualité environnementale du produit est à son niveau le plus élevé ($\lambda^g + \psi^g = 2$).
- S_{max}^g : limite maximale pour le prix unitaire de vente du produit vert. Ce prix correspond au prix maximum accepté par les clients verts lorsque $\lambda^g + \psi^g = 2$.
- G_u : le niveau minimal de la qualité environnementale accepté par les clients verts.

5.4.2 Fonction objectif

Comme dans le premier modèle, l'objectif ici est de maximiser le profit total exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max } (& s^g \sum_{f=1}^F x_f^g + S^o \sum_{f=1}^F x_f^o - \sum_{f=1}^F C_f(x_f^o + x_f^g) - \sum_{f=1}^F k_f \sigma_f - \sum_{r=1}^R P_r^T \delta_r (\sum_{f=1}^F x_f^o (1 - v_r^o) + \sum_{f=1}^F x_f^g (1 - v_r^g)) \\ & - \sum_{r=1}^R P_r^G \delta_r (\sum_{f=1}^F x_f^o v_r^o + \sum_{f=1}^F x_f^g v_r^g) - \sum_{m=1}^N Q_m e_m + \sum_{m=N+1}^M Q_m^- e_m^- - \sum_{m=N+1}^M Q_m^+ e_m^+) \end{aligned}$$

Notons que si on utilise deux processus de production différents pour la fabrication du produit vert et du produit ordinaire, alors l'entreprise aura à investir dans les deux processus et supportera ainsi les coûts fixes de deux processus. Toutefois, si les deux produits sont fabriqués en utilisant le même processus de production alors un seul coût fixe est engagé. Ceci est exprimé à travers la variable binaire σ_f , où $\sigma_f = 1$ si $z_f^o = z_f^g = 1$ ou $z_f^o + z_f^g = 1$ et 0 sinon. L'introduction de cette variable évite que le coût d'un processus de production soit considéré deux fois lorsque le même processus de production est utilisé pour la fabrication du produit ordinaire et celui vert. Les contraintes suivantes expriment la relation entre la variable σ_f et les variables binaires de choix de processus de production z_f^o et z_f^g .

$$z_f^o \leq \sigma_f \leq z_f^o + z_f^g \quad (12)$$

$$z_f^g \leq \sigma_f \quad (13)$$

La fonction objectif du modèle *MPC2* est non linéaire. Tout d'abord, nous devons enlever cette non-linéarité afin de résoudre le modèle avec Cplex. Le premier type de non linéarité est le produit d'une variable binaire et une variable continue ($x_f^0 v_f^0$). Le second type de non-linéarité est le produit d'une variable entière bornée et d'une variable continue non négative bornée ($s^g \sum_{f=1}^F x_f^g$). Ces deux types de non-linéarités sont connus dans la littérature. Nous avons utilisé les procédures de linéarisation détaillées dans [Billionet \(2007\)](#) pour les transformer en un ensemble d'expression et de contraintes linéaires.

5.4.3 Formulation des contraintes de la demande et du prix

Nous avons présenté dans le chapitre 2, les détails de la modélisation de la segmentation du marché. Dans cette section, nous rappelons alors les principales hypothèses et nous donnons les expressions mathématiques des contraintes.

Nous rappelons que la demande et le prix du produit ordinaire sont des paramètres constants (respectivement D^o et S^o). Toutefois, la demande et le prix du produit vert sont des paramètres endogènes qui croient linéairement avec l'augmentation du niveau de la qualité environnementale du produit fini. Ils sont respectivement bornés par D_{max}^g et S_{max}^g .

La demande (d^g) et le prix de vente (s^g) du produit vert sont donnés par les expressions suivantes :

$$d^g = \frac{D_{max}^g}{2-G_u} (\lambda^g + \psi^g) - \frac{D_{max}^g G_u}{2-G_u} \quad (14)$$

$$s^g = \frac{S_{max}^g - S^o}{2-G_u} (\lambda^g + \psi^g) + \frac{2S^o - S_{max}^g G_u}{2-G_u} \quad (15)$$

La contrainte (16) garantit que le niveau de la qualité environnementale du produit vert soit supérieure au niveau minimal accepté par les clients verts. Selon la contrainte (17), le niveau de la qualité environnementale du produit vert doit être supérieur au niveau de la qualité environnementale du produit ordinaire.

$$(\lambda^g + \psi^g) \geq G_u \quad (16)$$

$$(\lambda^o + \psi^o) \leq (\lambda^g + \psi^g) \quad (17)$$

Nous rappelons que dans cette section, nous avons mis l'accent seulement sur les aspects nouveaux dans la formulation de *MPC2* par rapport à *MPC1*.

5.5 Comparaison entre stratégie de mass marketing et stratégie de segmentation du marché

Dans cette section, nous étudions comment la compréhension approfondie de la structure du marché et les actions en faveur de la satisfaction des clients (en offrant à chaque type de clients une variété appropriée du produit fini), peuvent impacter les décisions et les profits des entreprises. Pour ce faire, nous comparons les décisions et les profits du modèle *MPC1* où un seul produit est offert sur le marché à ceux du modèle *MPC2* où une variété spécifique est offerte à chaque segment du marché. Nous utilisons les mêmes données numériques présentées pour les expérimentations du modèle *MPC1*. Les données concernant la demande et les prix de vente du produit vert, sont présentées simultanément avec l'approche des expérimentations. Nous établissons l'approche suivante pour mener nos expérimentations :

- Tout d'abord, nous résolvons le modèle *MPC2* en considérant les données suivantes : $D_{max}^g=600$, $D^o = 1000$, $S_{max}^g = 120$, $S^o = 100$, et $G_u= 0.5$. Nous notons par G_2 le profit correspondant et par λ_2^o , ψ_2^o , λ_2^g , et ψ_2^g les attributs de la qualité environnementale correspondant à la solution du modèle.
- En second lieu, nous considérons le modèle *MPC1*. Nous rappelons que dans ce cas, l'expression de la demande est la suivante : $d = \bar{D} + \alpha * (\lambda + \psi)$. Afin de pouvoir comparer *MPC1* à *MPC2*, nous considérons que $\alpha = 300$ et $\bar{D}= 1000$. Cela signifie que la demande totale du marché (pour les clients ordinaires et verts) peut varier entre 1000 et 1600 (rappelons que pour *MPC2*, $D_{max}^g + D^o = 1600$). Pour *MPC1*, il n'y a qu'une seule variété du produit fini qui est mise sur le marché. Afin de rendre les paramètres de *MPC1* aussi proches (comparables) que possible de ceux de *MPC2*, nous fixons le prix unitaire de vente à $\left(\frac{S_{max}^g + S^o}{2}\right)$. Ensuite, nous résolvons le modèle *MPC1* avec les données décrites ci-dessus ($\alpha = 300$, $\bar{D} = 1000$ et $S = \frac{S_{max}^g + S^o}{2}$).

- Ensuite, à partir de la solution de *MPC1*, nous récupérons les valeurs des attributs environnementaux que nous notons λ^* et ψ^* ; $\lambda^* = 0,76$ et $\psi^* = 0$. Nous injectons ces solutions dans le modèle *MPC2* afin de l'obliger d'adopter la même solution en termes de décisions de chaîne logistique que le modèle *MPC1* et nous calculons la fonction objectif du modèle *MPC2* une deuxième fois. En d'autres termes, nous imposons que dans *MPC2*, on offre un seul produit avec un niveau de qualité environnementale égale à 0,76 ($\lambda^* + \psi^* = 0.76$). Le profit optimal, obtenu dans ce cas, est noté par G_3 .
- Finalement, nous calculons le pourcentage de gain g défini par $\frac{(G_2 - G_3) * 100}{G_3}$.

Le tableau 5.3 résume les résultats pour différentes valeurs de S_{max}^g .

Tableau 5.3. Résultats comparatifs pour (MPC2)

	<i>Modèle MPC2 avec imposition de la solution de MPC1 (une seule variété)</i>	<i>Modèle MPC2 (Une variété spécifique pour chaque segment)</i>	
S_{max}^g	G_3	G_2	$g = \frac{(G_2 - G_3) * 100}{G_3}$
100	18180	19682	8%
110	18180	23950	31%
120	15809	28219	78%

Le tableau 5.3 révèle les résultats suivants :

- Le profit est plus important lorsque l'entreprise offre un produit spécifique pour chaque segment du marché.
- Le pourcentage de gain croît avec l'augmentation de la valeur de S_{max}^g et peut être très important (78%).

Ainsi, lorsque le marché est segmenté entre des clients ordinaires et des clients verts, alors l'entreprise peut soit ignorer cette segmentation et offrir un seul produit pour tous les clients (cas de *MPC1*) soit prendre en compte cette segmentation et offrir une variété spécifique du produit fini pour chaque segment (cas de *MPC2*). Nous avons montré que l'intégration de la stratégie de segmentation de marché dans les modèles d'optimisation des décisions de la

chaîne logistique peut conduire à une augmentation significative du profit de l'entreprise par rapport au cas de mass marketing où une variété unique du produit fini est mise sur le marché.

5.6 Impact des législations sur la qualité environnementale des produits et la performance environnementale de l'entreprise

Dans cette section, nous procédons à une analyse de sensibilité qui étudie l'impact des valeurs seuils d'émission imposés par les gouvernements et des coûts d'achats PEN sur la qualité environnementale des produits fabriqués et la performance environnementale de l'entreprise. Nous considérons pour cette étude, le modèle *MPC2* dans lequel nous considérons que le marché est segmenté et que l'entreprise offre alors une variété spécifique pour chaque segment du marché.

Le tableau 5.4 présente les niveaux seuils imposés par les gouvernements et qui ne peuvent pas être dépassés pour chaque type d'émission polluante.

Tableau 5.4. Niveaux seuils pour différents types d'émission considérée

Emissions	CCO–Cr ($m=1$)	Détergent biodégradable ($m=2$)	CBO5 ($m=3$)
Niveaux seuils (E_m)	500	350	25

5.6.1 Impact des législations de type valeurs seuils d'émission

Nous nous intéressons plus particulièrement au premier type d'émission (à savoir le : CCO–Cr) et nous faisons varier la valeur du niveau seuil imposé afin d'évaluer son impact d'une part sur la qualité environnementale des produits fabriqués et d'autre part sur la performance environnementale de l'entreprise (c.-à-d. la quantité totale des différentes émissions dégagées : $\sum_{m=1}^M e_m$). Les résultats de ces expérimentations sont présentés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5. Impact de la variation de la valeur seuil d'émission

Valeur Seuil	Quantité totale des émissions ($\sum_{m=1}^M e_m$)	attributs environnementaux		Processus sélectionné	
		produit ordinaire	produit vert	Pour produit ordinaire	Pour produit vert
3500 – 2300	4075	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.50$	$\lambda^g = 0.34$ $\psi^g = 0.76$	<i>Processus 3</i>	<i>Processus 4</i>
2200 – 1200	2528	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	$\lambda^g = 0.34$ $\psi^g = 0.76$	<i>Processus 4</i>	<i>Processus 4</i>
1100	2172.5	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	$\lambda^g = 0.34$ $\psi^g = 0.76$	<i>Processus 4</i>	<i>Processus 4</i>
1000	1975	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	$\lambda^g = 0.34$ $\psi^g = 0.76$	<i>Processus 4</i>	<i>Processus 4</i>
800	1580	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	$\lambda^g = 0.34$ $\psi^g = 0.76$	<i>Processus 4</i>	<i>Processus 4</i>
600	1185	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert
500	975	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert
400	790	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert
300	650	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert
200	345	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert
100	197.5	$\lambda^o = 0$ $\psi^o = 0.76$	Pas de produit vert	<i>Processus 4</i>	Pas de produit vert

A partir du tableau 5.5, nous observons ce qui suit :

- Si le seuil est entre 3500 et 2300, l'entreprise choisit le processus le plus propre (*Processus 4*) pour la fabrication du produit vert. Le *Processus 3* qui est plus polluant, est utilisé pour la fabrication du produit ordinaire.
- Si le niveau seuil est entre 2200 et 800 (lignes 2, 3, 4 et 5 du tableau 5.5), le niveau de la qualité environnementale du produit ordinaire augmente par rapport au cas précédent. En effet, afin de réduire la quantité totale de l'émission CCO-Cr et de se conformer à la réglementation qui devient plus stricte, l'entreprise sélectionne le processus de production le plus propre (*Processus 4*) pour la fabrication des produits ordinaires, ce qui a permis de faire passer la qualité environnementale du produit ordinaire de 0.5 à 0.76. Dans ce cas la

diminution du seuil d'émission a un impact positif sur la qualité environnementale du produit ordinaire.

- Lorsque le seuil est inférieur à 600, l'entreprise ne peut plus satisfaire les deux segments du marché. Elle ne fabrique plus de produits pour le segment vert et elle satisfait uniquement le marché ordinaire. Rappelons que lorsque le seuil des émissions est entre 2200 et 800, l'entreprise utilise le processus le plus propre pour fabriquer les produits ordinaires et verts. Lorsque le seuil est devenu plus stricte (600), l'entreprise ne peut plus améliorer le processus de production (le plus propre est déjà sélectionné pour les deux variétés), l'entreprise est donc dans l'obligation de limiter sa production. Etant donné que la demande du segment ordinaire est plus grande que celle du segment vert et que la variété ordinaire est moins coûteuse (pas d'utilisation de composant verts), il est alors plus profitable dans ce cas de satisfaire les clients ordinaires. Imposer des valeurs seuils très strictes, peut freiner la production des entreprises.
- Concernant la performance environnementale de l'entreprise, nous observons que la quantité totale des émissions dégagées par l'activité de production ($\sum_{m=1}^M e_m$), diminue suite à la réduction du seuil de l'émission CCO-Cr.

5.6.2 Impact des coûts d'achat des permissions d'émissions négociables (PEN):

Le troisième type d'émission polluante CBO5 ($m=3$) est soumis à des permissions d'émission négociables. Nous étudions ici, l'impact du coût d'achat des PEN d'une part sur la qualité environnementale des produits fabriqués et d'autre part sur la performance environnementale de l'entreprise en termes de quantité totale d'émissions dégagées ($\sum_{m=1}^M e_m$).

Les résultats de ces expérimentations sont présentés sur la Figure 5.2 et la Figure 5.3.

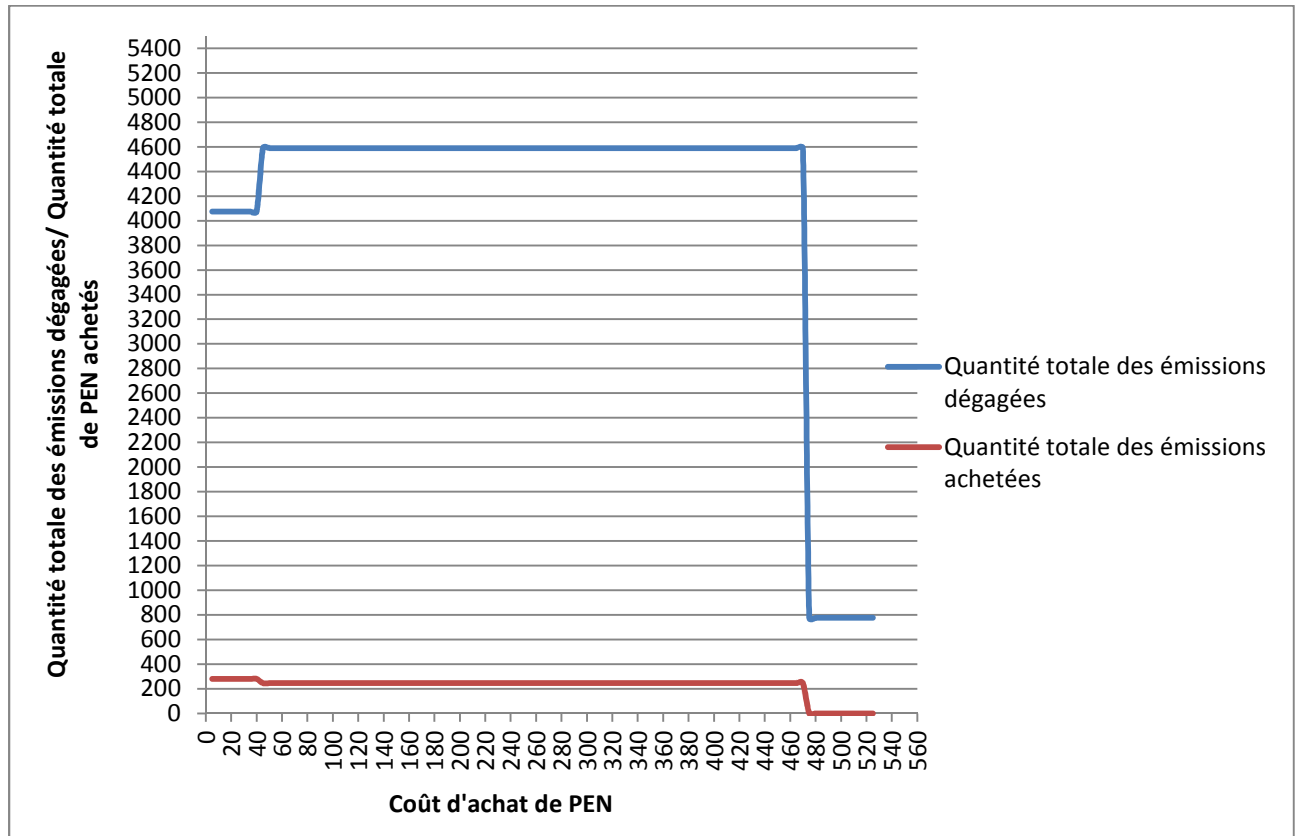


Figure 5.2. Evolution des quantités des émissions totales dégagées en fonction des coûts d'achats des PEN

En observant la Figure 5.2 nous constatons ce qui suit :

- Dans un premier temps, l'augmentation du coût d'achat des PEN (≥ 40) conduit à la diminution du nombre des PEN achetées par opposition à la quantité totale des émissions qui augmente. Ce résultat n'est pas intuitif. En effet, on s'attend à ce que la diminution de la quantité des PEN achetés conduise à la diminution de la quantité totale des émissions dégagées. En examinant de près les solutions de l'expérimentation, nous observons que lorsque le coût d'achat de PEN dépasse 40 euros, le modèle choisit le *Processus 3* qui dégage moins d'émission CBO5 comparé au *Processus 4* le plus propre, précédemment utilisé. Bien qu'il émette moins de CBO5, le *Processus 3* est plus polluant et dégage au total une quantité plus importante des émissions polluantes ($\sum_{m=1}^M e_m$).

Afin d'éviter le coût élevé d'achat de PEN pour l'émission CBO5, l'entreprise sélectionne un processus plus polluant mais moins émetteur de CBO5. Ainsi, l'entreprise paie plus de pénalités afin d'éviter les coûts élevés des PEN.

De la figure 5.3 qui présente la variation de la qualité environnementale des produits en fonction des coûts d'achat de PEN, nous dégagons ce qui suit :

- L'augmentation du coût d'achat de PEN peut impacter négativement la qualité environnementale des produits fabriqués. Lorsque le coût varie entre 5 et 40 euros, la qualité environnementale du produit vert est élevée ($\lambda^g + \psi^g = 1.1$ avec $\lambda^g = 0.76$ et $\psi^g = 0.34$). Lorsque le coût d'achat des PEN est supérieur à 40 euros, la qualité environnementale du produit vert diminue considérablement et il est égal au niveau minimal accepté par les clients verts ($\lambda^g + \psi^g = 0.5$ avec $\lambda^g = 0.5$ et $\psi^g = 0$). La demande verte, dans ce cas, est nulle.
- Lorsque le coût d'achat des PEN est très élevé (> 490 euros), l'entreprise ne fabrique plus de produit pour le segment vert. En effet, à ce coût très élevé, il n'est plus profitable pour l'entreprise d'acheter des permissions d'émission négociables, ce qui conduit à la limitation de sa production afin de se conformer au niveau seuil autorisé sans avoir recours à l'achat des PEN. Dans ce cas, en plus de l'absence de variété offerte pour le segment vert, nous observons que la qualité environnementale des produits ordinaires diminue pour devenir nulle ($\lambda^g + \psi^g = 0$). Puisque la quantité produite est limitée (pas de produits offerts pour le segment vert) alors l'entreprise se permet d'utiliser le processus le plus polluant pour les produits ordinaires (sans dépasser les seuils limites de pollution). Nous soulignons que le profit de l'entreprise est sévèrement impacté suite à la limitation de la production.

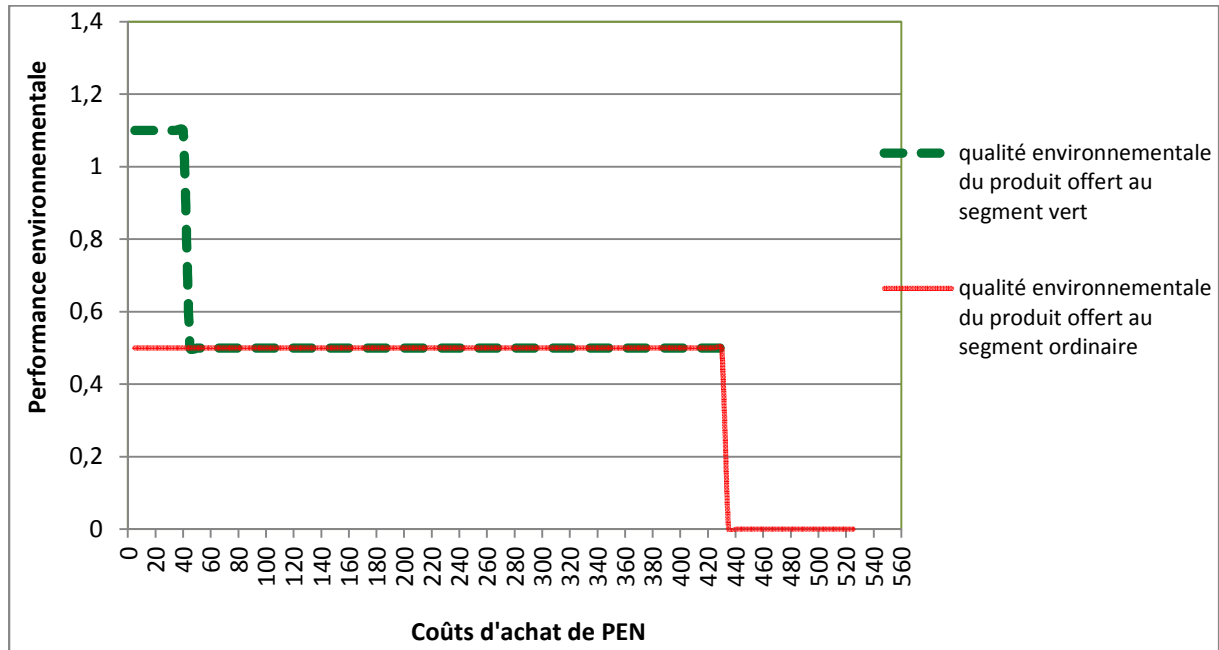


Figure 5.3. Variation de la qualité environnementale en fonction du coût d'achat des PEN

5.6.3 Impact des coûts de processus de production :

Nous cherchons maintenant à déterminer l'impact de la différence entre les coûts des processus ordinaires et ceux verts, sur la qualité environnementale des produits et les performances environnementales de l'entreprise.

La différence des coûts est exprimée en fonction d'un pourcentage qui détermine l'augmentation des coûts des différents processus considérés par rapport au processus le plus ordinaire (le plus polluant). Ce pourcentage varie entre 5 et 150%. Cette augmentation s'applique aux coûts fixes et aux coûts variables des processus ($C_f = C_f + x\% C_{f-1}$ et $k_f = k_f + x\% k_{f-1}$).

Les résultats sont résumés sur la Figure 5.4 et la Figure 5.5.

A partir de la Figure 5.4, nous observons les résultats suivants :

- L'augmentation des coûts des processus de production verts n'impacte pas la qualité environnementale des produits verts. En effet, lorsque l'augmentation est inférieure à 40%, la qualité environnementale totale des produits verts est égale à 1.1 avec $\lambda^g = 0,76$ et $\psi^g = 0,34$. Mais lorsque l'augmentation des coûts dépasse 40 % l'entreprise choisit un processus moins vert (*Processus 3*) ce qui engendre la diminution de la valeur de l'attribut environnemental lié aux émissions ($\lambda^g = 0,5$ au lieu de 0,76). Par contre

l'entreprise a recours à l'utilisation des composants verts afin d'améliorer la valeur de l'attribut $\psi^g = 0,6$ (au lieu de 0,3) et garder ainsi un niveau élevé de la qualité environnementale des produits verts.

- Bien que l'augmentation des coûts des processus n'impacte pas la qualité environnementale des produits verts, elle conduit à la diminution du niveau de la qualité environnementale des produits ordinaires. Lorsque l'augmentation des coûts est supérieure à 40%, la qualité environnementale du produit ordinaire passe de 0,76 à 0,5.

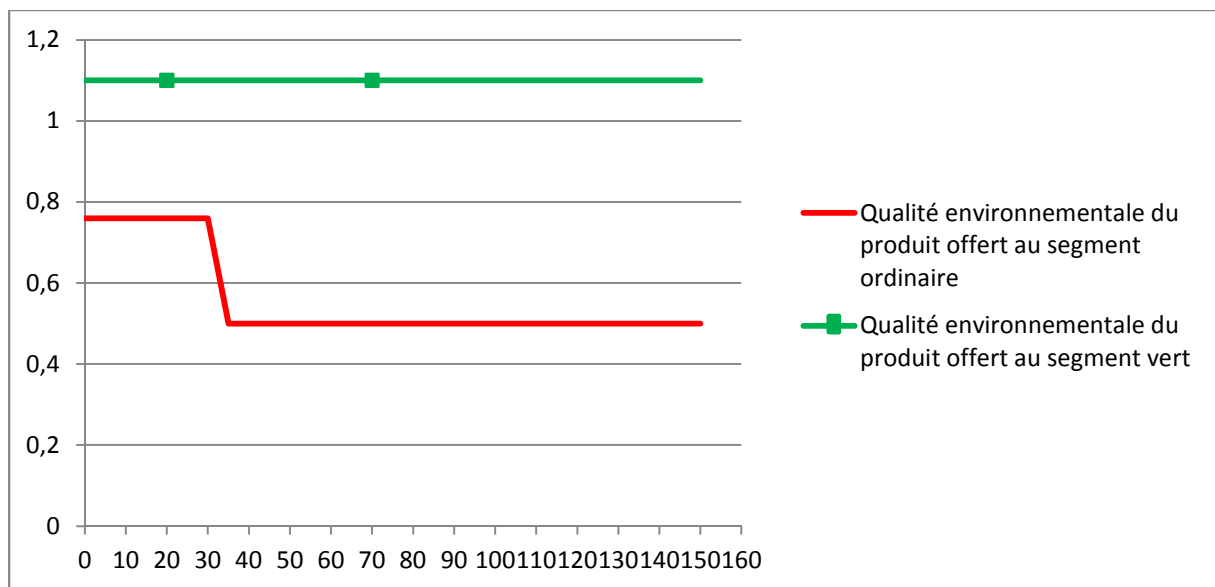


Figure 5.4. Variation de la qualité environnementale des produits en fonction de l'augmentation des coûts des processus de production

- La Figure 5.5 montre que si l'augmentation des coûts dépasse 40%, la quantité totale des émissions augmente considérablement. Comme expliqué ci-dessus, lorsque l'augmentation des coûts est entre 5 et 35%, l'entreprise choisit le *Processus 4*, le plus vert pour fabriquer les produits verts et également les produits ordinaires. Mais quand l'augmentation des coûts dépasse 40%, l'entreprise choisit un processus moins écologique (*Processus 3*) pour la fabrication des deux variétés du produit fini.

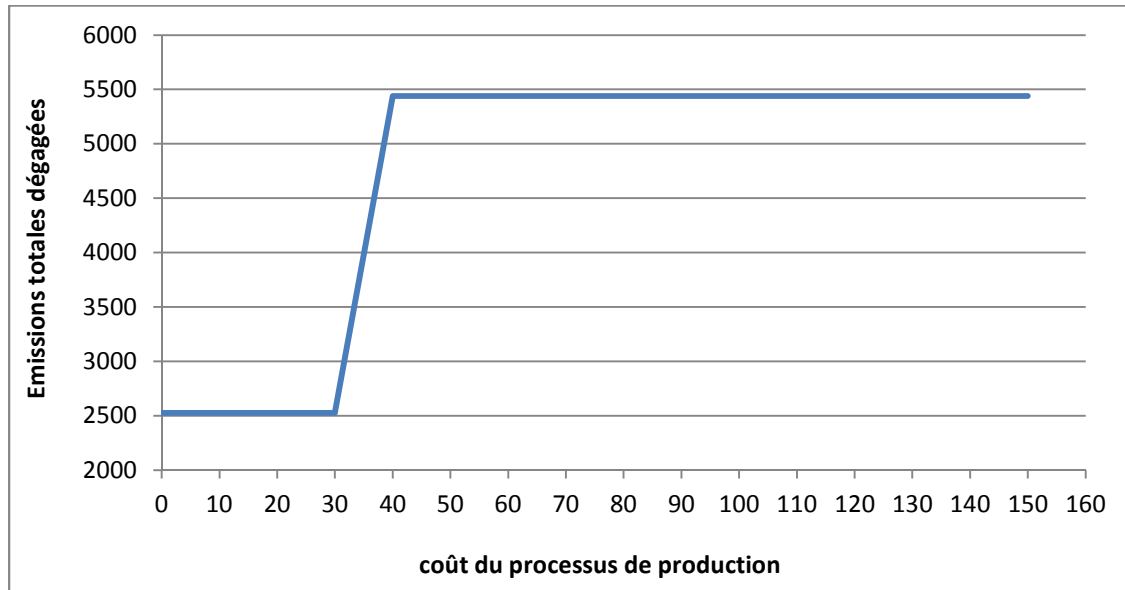


Figure 5.5. Variation de la qualité environnementale des produits en fonction de l'augmentation des coûts des processus de production

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré des modèles qui adressent simultanément les législations environnementales, les activités de sélection des processus de production et de choix des composants, et dans lesquels la demande dépend du niveau de la qualité environnementale du produit fini.

Nous avons effectué des expérimentations afin de comparer les stratégies de mass marketing et de segmentation du marché. Nous avons montré que les avantages, qui découlent de la connaissance précise de la structure du marché et donc de la mise en place d'une stratégie permettant de satisfaire les deux segments du marché en offrant à chacun un produit spécifique, peuvent être très importants.

A travers une étude expérimentale, nous avons également étudié l'impact des législations environnementales sur la qualité environnementale des produits et la performance environnementale des entreprises. Nous avons observé que des contraintes environnementales strictes ne mènent pas forcément à une amélioration de la qualité environnementale des produits fabriqués et de la performance environnementale des entreprises. Des législations environnementales très strictes peuvent être un obstacle à la productivité des entreprises et entraîner par la suite une détérioration importante des performances économiques des entreprises.

Pour les gouvernements, de tels modèles peuvent alors constituer un outil d'aide à la décision qui leur permet d'évaluer et instaurer des politiques environnementales afin de garantir à la fois le respect de l'environnement et la compétitivité des entreprises.

Pour ces dernières, de tels modèles leur permettent de répondre aux réglementations environnementales d'une manière proactive plutôt que réactive. Elles seront capables de satisfaire les clients verts et de gagner de nouveaux marchés. Ainsi les contraintes environnementales peuvent être vues comme moteur d'innovation et de compétitivité plutôt que des obstacles.

Conclusion Générale

Les enjeux environnementaux s'imposent à de très nombreuses activités et bien sûr les chaînes logistiques, par leurs activités de production et de transport notamment, sont fortement impactés. De nombreux travaux sur la conception de « chaînes logistiques vertes » ont donc vu le jour ces dernières années ([Chaabane et al., 2012](#) ; [Chaabane et al., 2011](#) ; [Quariguasi Frota Neto et al. 2009](#) ; [Quariguasi Frota Neto et al. 2008](#) ; [Letmathe et Balakrishnan, 2005](#) ; etc.). Aucun de ces travaux ne tient compte de la relation entre les décisions de la chaîne logistique et la qualité environnementale des produits fabriqués. Une originalité des travaux menés dans le cadre de cette thèse, est de montrer que les décisions prises lors de la conception d'une chaîne logistique (localisation des sites, choix des modes de production, de transport,...) ont une influence sur la qualité environnementale d'un produit perçue par les clients, et influent donc sur la demande de ces produits. Cette demande n'est en fait pas exogène comme presque toujours supposé dans les modèles existants mais bien endogène.

Notre travail de recherche s'articule autour de trois apports principaux :

- l'identification des caractéristiques et particularités de la conception de chaînes logistiques dans le contexte environnemental ;
- le développement des modèles mathématiques d'optimisation qui sont adaptés à ce type de problème ;
- l'exploitation de ces modèles sur des exemples pour illustrer quels types de recommandations managériales peuvent être dérivés.

Apport en identification des impacts du contexte environnemental sur la conception des chaînes logistiques

Nous avons étudié et analysé dans le chapitre 1, les différents aspects du problème de conception des chaînes logistiques dans le contexte environnemental. Notre étude s'est articulée autour des volets suivants :

- identification des différentes politiques environnementales suivies par les gouvernements ;
- étude des comportements des clients finaux envers les questions environnementales et en particulier envers la performance environnementale des produits achetés ;
- étude des politiques des entreprises envers les questions environnementales ;
- revue de différents modèles existants sur la conception des chaînes logistiques en tenant compte des défis environnementaux ;

Ces éléments nous ont permis de dégager les caractéristiques essentielles du contexte environnemental qui influencent la conception des chaînes logistiques. Ces caractéristiques peuvent être regroupées en trois axes :

- Une importante corrélation entre les décisions logistiques et la qualité environnementale du produit fini;
- Une demande et un prix endogènes qui dépendent de la qualité environnementale des produits ;
- Un contexte législatif très important à prendre en compte (limitations de certaines émissions, pénalités, droits à polluer, taxe carbone, etc.). Les décisions des entreprises dépendent fortement de ce contexte législatif.

A la lumière de ces résultats, nous avons élaboré une approche générale de modélisation qui permet de tenir compte de ces facteurs afin de développer des modèles mathématiques appropriés à la conception de chaînes logistiques dans le contexte environnemental.

Par exemple, nous avons montré qu'il faut adopter une modélisation d'une demande endogène qui varie en fonction de la qualité environnementale des produits. Nous avons également, montré l'importance d'une méthode qui permet de mesurer et quantifier la performance environnementale des produits en fonction des activités logistiques.

Dans le chapitre 2, nous avons apporté une réponse aux questions soulevées dans l'approche générale de modélisation. Nous avons présenté une méthode de mesure de la performance environnementale des produits en se basant sur les activités de la chaîne logistique. Nous avons décidé de représenter la performance environnementale par un vecteur de trois attributs environnementaux qui sont liés aux émissions polluantes dégagées par le procédé de fabrication, la composition du produit en termes de composants verts et les émissions de carbone générées par les activités de transport tout au long de la chaîne logistique. Nous avons présenté également une modélisation de la demande et du prix du produit fabriqué en fonction du niveau de sa performance environnementale. Nous avons tout d'abord, considéré le contexte de mass marketing où l'entreprise décide d'offrir une seule variété du produit fini et dans ce cas le prix est constant et la demande est endogène et dépend de la performance environnementale du produit. Puis, nous avons considéré le contexte de segmentation de marché où l'entreprise offre une variété spécifique pour chaque segment du marché (vert et

ordinaire). Dans ce cas, le prix et la demande de la variété offerte au segment vert sont endogènes et dépendent du niveau de sa performance environnementale.

Afin d'illustrer et de valider l'approche de modélisation proposée, nous avons décrit dans le chapitre 3 un cas réel du secteur de textile.

Apport en développement de modèles mathématiques pour la conception de chaînes logistiques vertes avec prise en compte de la qualité environnementale des produits

En termes de modélisation, notre travail apporte deux contributions pour les modèles mathématiques existants. Ces contributions résident dans :

- La modélisation de la qualité environnementale des produits fabriqués en fonction des décisions de la chaîne logistique. Comme déjà indiqué, nous représentons la qualité environnementale du produit fini par trois attributs. Plus précisément, le premier attribut, β , correspond au taux de réduction de carbone des activités de transport par rapport à la quantité de carbone émise quand la qualité environnementale des produits n'est pas considérée. Le second attribut, λ , est le taux de réduction des émissions de gaz qui peut être atteint en utilisant un processus de production donné par rapport au niveau d'émission obtenu si le processus le plus « conventionnel » est utilisé. Le troisième attribut, ψ , est le taux des composants verts utilisés pour fabriquer le produit fini par rapport au nombre total de composants utilisés. Ainsi chacun des attributs varie entre 0 et 1. La qualité environnementale globale est égale à la somme des ces trois attributs pondérés par des coefficients de sensibilité.
- La prise en compte de la relation entre la qualité environnementale d'un produit, son prix et sa demande. Le comportement des clients envers les produits verts dépend du niveau de leur sensibilité aux questions environnementales et leur volonté à payer plus pour l'obtention des produits verts. Cette volonté est fortement liée au niveau de conscience des clients et à la nature même du produit (cosmétique, alimentaire, etc.). Dans ce travail, nous avons présenté deux modélisations différentes du marché. Nous avons tout d'abord, considéré le cas où le prix est constant et la demande est endogène et dépend de la performance environnementale du produit. Puis, nous avons modélisé le cas de segmentation de marché où le prix et la demande de la variété offerte au segment vert sont endogènes et dépendent du niveau de sa performance environnementale.

La prise en compte de ces différents aspects est présentée dans les chapitres 4 et 5. Nous avons élaboré, dans le chapitre 4, deux modèles *MLT1* et *MLT2* de sélection des fournisseurs,

de localisation des sites de production et de choix de modes de transport, dans lesquels la demande dépend du niveau de la qualité environnementale du produit fini et dans lesquels la qualité environnementale est mesurée en se basant sur le taux des émissions carbone des activités de transport (attribut environnemental β). Les expérimentations que nous avons réalisées ont prouvé la pertinence de l'intégration de la qualité environnementale des produits dans les modèles d'optimisation de la chaîne logistique, en soulignant les avantages économiques et environnementaux qui résultent de l'intégration de la qualité environnementale des produits dans les modèles de conception des chaînes logistiques. Les modèles présentés dans ce chapitre peuvent être considérés comme les premiers modèles qui abordent d'une part la relation entre les décisions de conception de la chaîne logistique et la qualité environnementale des produits et d'autre part la relation entre la demande et la qualité environnementale du produit fini. Dans ce chapitre nous avons considéré le cas de mass marketing puisqu'un seul produit fini est offert aux différents clients (ordinaires et verts).

Dans le chapitre 5, nous avons proposé le modèle *MPC1* qui s'intéresse à la modélisation de l'impact des décisions de choix de technologies de production et de sélection des composants sur la qualité environnementales des produits. En plus de la considération d'autres types de décisions de la chaîne logistique et par la suite d'autres types d'attributs environnementaux (attributs environnementaux λ et ψ), la différence entre le modèle *MPC1* par rapport aux modèles *MLT1* et *MLT2* consiste dans l'intégration des législations environnementales portant sur les émissions polluantes.

Les expérimentations relatives au modèle *MPC1* ont permis de confirmer les résultats démontrés par *MLT1* et *MLT2* en termes de pertinence de la problématique.

Dans les modèles *MLT1*, *MLT2* et *MPC1*, nous avons considéré la politique de mass marketing. Pour cela, nous avons précisé que le produit fini est vendu à un prix fixe donné pour les différents clients. Par ailleurs, nous avons vu qu'il est important de prendre en compte le cas de segmentation du marché. Une bonne connaissance de la structure du marché permet notamment à l'entreprise d'affiner sa politique de production en offrant une variété différente du produit fini pour chaque segment du marché (ordinaire et vert). Ceci permet à l'entreprise de fixer le prix de la variété offerte au segment vert en fonction de son niveau de qualité environnementale. Nous avons alors proposé le modèle *MPC2*. Les expérimentations de ce modèle mettent en évidence qu'une entreprise peut réaliser un gain économique si elle offre une variété spécifique pour chaque type de clients.

Dans le chapitre 5, nous avons étudié également, l'impact des législations environnementales sur les décisions logistiques et par la suite sur la qualité environnementale des produits fabriqués et la performance environnementale des entreprises.

Apport en recommandations managériales

Les modèles proposés ont été exploités pour fournir des recommandations managériales aux entreprises et aux gouvernements qui se résument comme suit :

- L'intégration de la qualité environnementale des produits, a un impact significatif sur les performances économiques et environnementales des entreprises. Les coûts élevés généralement liés à la conformité aux lois environnementales et l'amélioration de la performance environnementale des produits sont compensés par l'augmentation des ventes suite au gain de nouvelles parts de marché.
- Plus les clients verts sont prêts à payer plus pour la qualité environnementale des produits, plus le gain économique résultant de la stratégie de segmentation de marché par rapport à la stratégie de mass marketing est important.
- Des réglementations strictes peuvent mener dans certains cas, à une détérioration significative des performances économiques et environnementales des entreprises. Elles peuvent paradoxalement impacter négativement la performance environnementale des produits, d'où la nécessité d'un cadre législatif bien étudié et adapté pour permettre aux entreprises d'améliorer leurs performances environnementales tout en assurant leur développement économique. Ce résultat est en conformité avec plusieurs autres études menées dans la littérature sur l'impact des législations environnementales sur les performances économiques et environnementales des entreprises ([Letmathe et Balakrishnan, 2005](#); [Bouchery et al., 2012](#)).

Les limites et perspectives du travail réalisé

L'approche proposée dans le cadre de ces travaux présente des limites sur différents points.

Une première perspective serait d'améliorer les modèles existants en affinant la modélisation de la demande en fonction de la qualité environnementale des produits afin de se rapprocher du contexte réel.

Une deuxième perspective de ce travail serait d'intégrer les activités de la logistique inverse telles que le recyclage et la re-fabrication vue leurs impacts importants sur la performance

environnementale des produits et leurs influences sur les performances économiques et environnementales des entreprises.

Enfin, nous avons souligné l'importance d'une vision globale qui intègre les différentes activités logistiques. Optimiser l'impact d'une seule activité isolément des autres peut conduire à améliorer la performance environnementale de cette activité au détriment des autres activités logistiques. Par exemple, si nous considérons un problème de sélection des fournisseurs en fonction des critères environnementaux (composants verts, audit et certification environnementaux) sans tenir compte de l'activité de transport, nous risquons d'augmenter le nombre de kilomètres parcourus lors de l'acquisition des composantes et le taux d'émission de carbone. L'importance des modèles globaux pour la conception des chaînes logistiques dans un contexte environnementale, a été soulignée dans plusieurs travaux de la littérature ([Quariguasi Frota Neto et al. \(2008, 2009\)](#) et [Chaabane et al. \(2012\)](#)). Toutefois, nous ne trouvons pas de travaux qui s'intéressent à la conception de la chaîne logistique sous des contraintes environnementales avec une vision globale intégrant les différentes activités logistiques. Nous présentons à la fin de ce travail (en annexe) un modèle global de conception des chaînes logistiques qui tient compte de l'ensemble des décisions logistiques étudiées dans les modèles décentralisés *MLTI* et *MPCI*. Une perspective intéressante serait de conduire des études expérimentales qui comparent les performances économiques et environnementales du modèle global à celles des modèles décentralisés. Ces études viennent d'être lancées dans le cadre d'un projet de fin d'études.

References

- Abdessalem, M, A. B. Hadj-Alouane, D. Riopel (2012). Decision modelling of reverse logistics systems: Selection of recovery operations for end-of-life products. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 13(2):139-161.
- Bala, A., Muñoz, P., Rieradevall, J., Ysern, P., 2008. Experiences with greening suppliers. The Universitat Autònoma de Barcelona. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1610-1619.
- Baud-Lavigne B., B. Agard, B. Penz., 2010. Mutual impacts of product standardization and supply chain design. *International Journal of Production Economics*. (In Press).
- Beamon, B. M., 1998. Supply Chain Design and Analysis: Models and Method. *International Journal of Production Economics*, 55, 281-294.
- Benjaafar, S., Li, Y. and Daskin, M., 2010. Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models. *working paper. University of Minnesota*.
- Berna Yenice-Ay 2002. Green Supply Chain Modeling for Multinational Companies. Georgia Institute of Technology.
- Bouchery Y., A. Ghaffari, Z. Jemai, Y. Dallery, 2012. "Including sustainability criteria into inventory models", *European Journal of Operational Research*, 222, 2, 229 240.
- Brécard, D., Hlaimi, B., Lucas, S., Perraudau, Y. and Salladarré F., 2009. Determinants of demand for green products: An application to eco-label demand for fish in Europe. *Ecological Economics*, 69, 115-125.
- Berendes, K., Winters, K.P., 1995. Das Abwasserabgabengesetz. Beck, Munich, Germany.
- Blengini, G.A. and D.J. Shields, 2010. Green Labels and Sustainability Reporting: Overview of the Building Products Supply Chain In Italy. *Management of Environmental Quality*, 21:4, 477-93.
- Borchardt, M., Wendt, M. H., Pereira, G. M., Sellitto M. A., 2011. Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements.
- Braungart, M., McDonough, W., Bollinger, A., 2007. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15, 1337-1348.
- Cachon, G.P., 2011. Supply chain design and the cost of greenhouse gas emissions. *Working paper. University of Pennsylvania*.
- Cantor, D.E., Corsi, T.M. and Grimm, C.M., 2006. "Safety technology adoption patterns in the US motor carrier industry", *Transportation Journal*, 45, 20-45.
- CEMT (2007), Transports et émissions de CO₂ : quels progrès ?, ISBN 92-821-2379-0.

- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M., 2012. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135, 37-49.
- Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M., 2011. Designing supply chains with sustainability considerations. *Production Planning & Control*, 22(8), p.727-741.
- Chardine-Baumann, E., 2011. Modèles d'évaluation des performances économique, environnementale et sociale dans les chaines logistiques. *Phd dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*.
- Chen, C., 2001. Design for the Environment: A Quality-Based Model for Green Product Development, *Management Science*, 47, 250–263.
- Chen, C. and Monahan, G. E., 2010. Environmental safety stock: The impacts of regulatory and voluntary control policies on production planning, inventory control, and environmental performance. *European Journal of Operational Research*, 207, 1280-1292.
- Chopra, S., Meindl, P., 2004. *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations*, second ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Craig, R., Carter and Dale S., Rogers 2008. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38, 360-387.
- Crum, M.R., Dooleyand, F.J., Morrow, P.C, 1995. Employee attitudes about railroad injury compensation. *Transportation Journal*, 35, 15-29.
- Dangelico, R. M., Pontrandolfo, P., 2010. From green product definitions and classifications to the Green Option Matrix. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1608-1628.
- Debo L. G., L. B. Toktay, L.N.V. Wassenhove, 2005. Market Segmentation and Product Technology Selection for Remanufacturable Products. *MANAGEMENT SCIENCE*, 51, 8, 1193–1205.
- DHL, 2010. Delivering Tomorrow: Towards Sustainable Logistics. *Deutsch Post DHL Report*.
- Dobos, I., 1999. Production strategies under environmental constraints in an Arrow-Karlin model. *Int. J. Production Economics*, 59, 337-340.
- Eurobarometer (2009) : European Commission, 2009. Europeans' attitudes towards the issue of sustainable consumption and production. *Flash Eurobarometer 256*.
- European Commission, 2008. Attitudes of Europeans citizens towards the environment. *Eurobarometer 295*.
- European Commission, 2009. Europeans' attitudes towards the issue of sustainable consumption and production. *Flash Eurobarometer 256*.

- Fixson, S.K., 2005. S.K. Product architecture assessment: a tool to link product, process, and supply chain design decisions. *Journal of Operations Management*, 23, 345–369.
- Forkenbrock, D. J., 2001. Comparison of external costs of rail and truck freight transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35, 321-337.
- Gehin, A., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2008. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16, 566-576.
- Hammami, R., Frein Y., B. Hadj-Alouane, A., 2008. Supply chain design in the delocalization context: Relevant features and new modeling tendencies. *International Journal of Production Economics*, 113, 641-656.
- Hammami, R., Frein Y., B. Hadj-Alouane A., 2009. A strategic-tactical model for the supply chain design in the delocalization context: Mathematical formulation and a case study. *International Journal of Production Economics*, 122, 351-365.
- Handfield, R., Walton, S.V, Sroufe, R., Melnyk, S.A, 2002. Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 141, 70-87.
- Hartl, R. F., and Kort, P. M., 1997. Optimal input substitution of a firm facing an environmental constraint. *European Journal of Operational Research* 99, 336-352.
- Houe, R., Grabot, B., 2009. Assessing the compliance of a product with an eco-label: From standards to constraints. *Int. J. Production Economics*, 121, 21–38.
- Hua, G., Cheng, T.C.E., and Wang, S., 2011. Managing carbon footprints in inventory management. *International Journal of Production Economics*, 132, 178-185.
- .
- Humphreys, P.K., Wong, Y.K., Chan F.T.S., 2003. Integrating environmental criteria into the supplier selection process Original Research Article. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 349-356.
- Ilgin, M. A., Gupta, S.M., 2010. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91, 563–591
- Jacobs, B.W., Singhal, V.R. and Subramanian, R., 2010. An empirical investigation of environmental performance and the market value of the firm. *Journal of Operations Management*, 28, 430-441.
- Jaegler A., P. Burlat. What is the impact of sustainable development on the re-localisation of manufacturing enterprises? *Production Planning & Control*.
- Janic, M., 2007. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12, 33-44.

- Jayaraman, V., Patterson, R. A., Rolland, E., 2003. The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150, 128-149.
- Jayaraman, V. and Luo, Y., 2007. Creating competitive advantages through new value creation: a reverse logistics perspective. *Academy of Management Perspectives*, 56-73.
- Kalevela, S.A. and Radwan, A.E., 1988. International issues of transporting hazardous materials, *Transportation Quarterly*, 42, 125-39.
- Kobayashi, H., 2006. A systematic approach to eco-innovative product design based on life cycle planning. *Advanced Engineering Informatics*, 20, 113-125.
- Kurtyka O., P. Mahenc (2011). The switching effect of environmental taxation within Bertrand differentiated duopoly. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 2, 267-277.
- Kumar, S., Putnam V., 2008. Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics*, 115, 305– 315.
- Krass D., Nedorezov T., and Ovchinnikov A., 2013. Environmental Taxes and the Choice of Green Technology. *Production and Operations Management*, 1–21, Production and Operations Management Society.
- Lambert, D. M., Stock, J. R., and Ellram, L. M., 1998. Fundamentals of Logistics Management, Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill, Chapter 14.
- Lamothe, J., Hadj-Hamou, K., Aldanondo, A., 2006. An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. *European Journal of Operational Research*, 169, 1030-1047.
- Lee, Ki-H., 2011. Integrating carbon footprint into supply chain management: the case of Hyundai Motor Company (HMC) in the automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1216-1223.
- Letmathe, P., Balakrishnan, N., 2005. Environmental considerations on the optimal product mix. *European Journal of Operational Research*, 167, 398–412.
- Levinson, D. M. and Gillen, D., 1998. The full cost of intercity highway transportation. *Transportation Research part-D*, 3, 207-223.
- Li J., González M., Zhu Y., 2009. A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 117, 286-301.
- Ljungberg, L. Y., 2007. Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, 28, 466-479.
- López-Gamero, M. D., Molina-Azorín, J. F., & Claver-Cortés, E., 2009. The whole relationship between environmental variables and firm performance: Competitive advantage

- and firm resources as mediator variables. *Journal of Environmental Management*, 90, 3110-3121.
- López-Gamero, M. D., Molina-Azorín, J. F., Claver-Cortés E., 2010. The potential of environmental regulation to change managerial perception, environmental management, competitiveness and financial performance. *Journal of Cleaner Production*, 18, 963-974.
- Luttrupp, C., Lagerstedt, J., 2006. EcoDesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1396-1408.
- Mahajan V., P. E. Green and S. M. Goldberg, 1982. A conjoint model for measuring self and cross-price/demand relationships. *J. Mktg Res.* 19, 334-342.
- Mahenc, P., 2008. Signaling the environmental performance of polluting products to green consumers. *Int. J. Ind. Organ.*, 26, 59–68.
- Meixell, M. J., Gargeya V. B., 2005. Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41, 531-550.
- Mollenkopf, D., Stolze, H., Tate W.L., Ueltschy, M., 2010. Green, lean and global supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40, 14-41.
- Morton and H. J. Jr. Devine, 1987. How prices really affect your sales. *Busin. Mktg* 72, 90-103.
- Nakano, K., Hirao, M., 2011. Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using LCA. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1189-1197.
- Nwokoye N. G., 1975. Subjective judgements of price: the effects of price parameters on adaption levels. *Am. Mktg Ass. Combined Proc.*, pp. 545-548.
- Ottman, J.A., Stafford, E.R., Hartman, C.L., 2006. Green marketing myopia. *Environment* 48, 22-36.
- Park, J., Sarkis J., Wu Z., 2010. Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production* 18, 1494-1501.
- Piecyk, M., and McKinnon, A., 2007. Internalising the External Costs of Road Freight Transport in the UK, Logistics Research Centre, School of Management and Languages, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, <http://www.greenlogistics.org>.
- Pujari, D., Wright, G., Peattie, K., 2003. Green and competitive: influences on environmental new product development (ENPD) performance. *Journal of Business Research*, 56, 657–671.
- Quariguasi Frota Neto, J., J.M., Bloemhof-Ruwaard, J.A.E.E.van Nunen, van Heck E., 2008. Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111, 195-208.

- Quariguasi Frota Neto, J., Walther G., Bloemhof J., van Nunen J.A.E.E., Spengle, T., 2009. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. *European Journal of Operational Research*, 193, 670-682.
- Radulescu, M., Radulescu S., Radulescu CZ., 2009. Sustainable production technologies which take into account environmental constraints. *European Journal of Operational Research* 193, 730-740.
- Ricci, A., Black, I., 2005. The Social Costs of Intermodal Freight Transport. *Research in Transportation Economics*, 14, 245-285.
- Rondinelli, D., and Berry, M., 2000. Multimodal Transportation, Logistics, and the Environment: Managing Interactions in a Global Economy. *European Management Journal*, 18, 398-410.
- Rungtusanatham, M., Forza C., 2005. Coordinating product design, process design, and supply chain design decisions, *Journal of Operations Management*, 23, 257-265.
- Sarkis, J., 2003. A strategic decision framework for green supply chain management. *Journal of Cleaner Production* 11, 397-409.
- Sawadogo, M., Anciaux D., 2011. Intermodal transportation within the green supply chain: an approach based on ELECTRE method *Int. J. Business Performance and Supply Chain Modelling*, 3, 43-65.
- Sharp, J.M., R.A. Novack and M.A. Anderson (1991). Purchasing hazardous waste transportation service: federal legal considerations. *Transportation Journal*, 31, 4-14.
- Shi J., Zhang G., Sha J., 2011. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers & Operations Research*, 38, 641-650.
- Seuring, S., Müller, M., 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1699-1710.
- Srivastava, S.K., 2007. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), p.53-80.
- Su Jack C.P., Liya Wang, Johnny C. Ho. The impacts of technology evolution on market structure for green products, (2012). *Mathematical and Computer Modelling*, 55, 1381-1400
- Teunter, R.H., Flapper, S.D.P., 2011. Optimal core acquisition and remanufacturing policies under uncertain core quality fractions. *European Journal of Operational Research*, 210, 241-248.
- Thomas, S., Ryan, M., 1999. Burning rivers. In: Yandle (Ed.), *Economic Analysis of Environmental Policy*. Rowman & Littlefield, New York.
- Tsoulfas, G. T., Pappis, C. P., 2008. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1647-1657.

Ülengin, F., Kabak, Ö., Önsel S., Ülengin, B., Aktas, E., 2010. A problem-structuring model for analyzing transportation-environment relationships. *European Journal of Operational Research*, 200, 844-859.

Venkataraman V. K., 1981. The price-quality relationship in an experimental setting. *J. Adm. Res.* 21, 49-52 .

Vidal Carlos J., Goetschalckx M., 1997. Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98, 1-18.

Wee Hui-Ming, W.H. Yang, C.W Chou, M. V. Padilan, 2012. Renewable energy supply chains, performance, application barriers, and strategies for further development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 8, 5451–5465.

Weener, E.F., Wheeler, P.B., 1992. Key elements of accident avoidance. *Logistics and Transportation Review*, 28, 49-60.

Weinstein, A. A., Dill, J., Nixon, H., 2010. Green transportation taxes and fees: A survey of public preferences in California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15, 189-196.

Wu, C.-C., Chang, N.-B., 2004. Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach. *European Journal of Operational Research*, 155, 68-95.

Young W., Hwang K., McDonalds S., Oates C.J., 2010. Sustainable consumption: green consumer behavior when purchasing products, *Sustainable Development Journal*, 18, 20-31.

Zhu, Q., Sarkis J., Lai, K-h., 2008. Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. *International Journal of Production Economics*, 111, 261–273.

Modèle global de conception de chaine logistique avec prise en compte de la qualité environnementale des produits et des législations environnementales

1. Introduction

Comme nous l'avons évoqué préalablement dans l'étude de la littérature et la conclusion du rapport, une vision globale est très importante pour l'optimisation de la chaine logistique sous des contraintes environnementales. Rappelons que malgré l'abondance des travaux qui existent sur le thème de la logistique verte, nous ne trouvons pas dans la littérature assez de travaux qui s'intéressent aux problèmes d'optimisation des chaines logistiques verte avec une vision globale regroupant les différentes activités logistiques ayant un impact sur l'environnement dans un seul modèle. Dans cette partie, nous complétons les approches existantes dans la littérature en présentant un modèle de conception de chaine logistique verte qui intègre les principales activités logistiques ayant un impact sur l'environnement. Nous considérons ici le cas de mass marketing.

2. Problématique et formulation

Il s'agit dans cette section de grouper les différentes activités présentées dans les modèles *MPC* et *MLT*. Il ne s'agit pas d'une simple intégration des différentes variables et de contraintes puisque un ensemble d'interactions existent entre les différents aspects des deux modèles.

2.1 Interactions entre les modèles :

Dans cette partie nous décrivons les principales interactions existant entre les modèles *MPC* et *MLT*.

Il est à noter que dans le modèle *MPC*, nous considérons des législations environnementales portant sur les émissions polluantes dégagées par un procédé donné. Vu que nous ne traitons pas dans ces modèles, la problématique de localisation des sites, nous n'avons pas considéré des cas où les législations environnementales peuvent varier en fonction de l'emplacement géographique du site de production.

En effet, comme nous l'avons indiqué dans le premier chapitre de ce rapport, les législations environnementales sont très différentes d'un pays à l'autre et dépendent fortement des objectifs de la croissance économique du pays et de sa conscience envers les enjeux environnementaux.

Ce type de considération modifie la structure de la chaîne. Un site loin des zones clients peut être sélectionné car le pays d'implantation ne met pas en place des réglementations environnementales.

Comme nous optimisons dans cette partie simultanément les décisions de localisation des sites et de choix de technologies de production, nous devons adapter la modélisation des réglementations environnementales afin qu'elles reflètent la diversité des types des réglementations en fonction de l'implantation géographique des sites potentiels.

Une deuxième interaction entre les modèles consiste dans des processus de production aux différents sites potentiels considérés. En fait le choix d'un processus donné dépend de l'emplacement du site de production. Certaines technologies peuvent être disponibles ou non dans une zone géographique donnée. Ceci dépend de la disponibilité de la main d'œuvre qualifiée et de la disponibilité des fournisseurs des machines nécessaires.

Les coûts de production et d'installation des processus de production diffèrent d'un site à un autre en fonction de sa localisation. Il est à noter également que les flux des produits et la capacité des sites de production dépend du processus de production sélectionné dans un site donné.

2.2 Formulation du problème :

Paramètres

- P : nombre des composants.
- J : nombre des sites potentiels de production.
- S : nombre des fournisseurs potentiels.
- F : nombre de processus potentiels de production.
- M : nombre de scénarios de transport.
- R : nombre des émissions considérées.
- RS_j : nombre des émissions soumis à des seuils limites dans le site j .
- RE_j : nombre des émissions soumis à des permissions échangeables dans le site j .

- E_{rj} : maximum permis des rejets soumis à une limite.
- E^T_{rj} : maximum permis pour échange avec les autres acteurs du marché
- Q_{rj} : prix de taxation des émissions.
- Q^+_{rj} : prix d'achat de permission d'émission échangeable.
- Q^-_{rj} : prix de vente de permission d'émission échangeable.
- ε_{rf} : quantité de l'émission r émise par le processus f .
- ε_{\max} : quantité maximale de rejets par unité du produit fabriqué.
- δ_p : quantité de composants p nécessaire pour une unité du produit fini.
- μ_p : importance du composant p en termes de son impact environnemental ($\sum_{p \in P} \mu_p = 1$).
- β_{\max} : référence de mesure : quantité de CO2 dégagée pour le transport d'une unité du produit fini lorsque la qualité environnementale du produit n'est pas considérée.
- β_{mj} : quantité du CO2 émise lors du transport d'une unité du produit fini du local j vers la zone consommateur en utilisant le scénario de transport m .
- β_{pmsj} : quantité du CO2 émise lors du transport composant p du fournisseur s vers le local j avec le scénario m .
- A : prix unitaire de vente du produit fini.
- \bar{D} : demande de base du produit fini (demande des clients ordinaires)
- PC^o_{pmsj} : coût unitaire d'achat et de transport du composant p de type « ordinaire » à partir du fournisseur s par le site j avec le scénario de transport m pour fabriquer une unité du produit
- PC^G_{pmsj} : coût unitaire d'achat et de transport du composant p de type « vert » à partir du fournisseur s par le site j avec le scénario de transport m pour fabriquer une unité du produit
- FC_j : coût fixe de l'ouverture du site j .
- FC_{fj} : coût fixe correspondant à l'activation du processus f dans le site j . Il est nul si on ne peut pas installer le processus f dans le site j .
- MC_{fj} : coût unitaire de production dans le site j en utilisant le processus f

- DC_{jm} : coût unitaire de livraison d'une unité du produit fini à partir du site j vers la zone clients avec le scénario m
- C_{jf}^{\max} : la capacité de production du site j par le processus f

Variables de décision

- $y_j=1$ si le site j est ouvert 0 sinon.
- $z_{fj}=1$ si le processus f est installé dans le site j , 0 sinon.
- $y_{pmsj}^o=1$ si le composant p , ordinaire, est transporté à partir du fournisseur s vers le local j avec le scénario m , 0 sinon.
- $y_{pmsj}^G=1$ si le composant p , vert, est transporté à partir du fournisseur s vers le local j avec le scénario m , 0 sinon.
- $y_{mj}=1$ si le produit ordinaire est transporté à partir du local j avec le scénario m vers la zone consommateur, 0 sinon.
- w_{mj} : quantité du produit transportée à partir du local j vers la zone consommateur avec le scénario m
- x_{fj} : quantité du produit fabriquée dans le local j avec le processus f .
- v_{pmsj}^o : quantité du composant p de type ordinaire transporté par le scénario m à partir du fournisseur s vers le local j pour fabriquer le produit fini.
- v_{pmsj}^G : quantité du composant p de type vert transporté par le scénario m à partir du fournisseur s vers le local j pour fabriquer le produit fini.
- e_{rj} : total des unités des émissions pour r dans $[1..R]$
- e_{rj}^+ : total des unités des émissions achetées pour r dans $[1... RE_j]$
- e_{rj}^- : total des unités des émissions vendues pour r dans $[1... RE_j]$

Fonction objectif

L'objectif du modèle est de maximiser le profit de l'entreprise qui est exprimé comme la différence entre les revenus (vente du produit fini pour les différents types de clients + gain obtenu par la vente des permissions d'émissions négociables) et les coûts (coûts d'achat des composants + coûts de production + coûts de transport + pénalités environnementales + coûts d'achat des PEN).

La fonction objectif peut alors être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned}
 Max \pi = & A \sum_{f,j} x_{fj} - \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PC^o_{pmsj} v^o_{pmsj} \\
 & - \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} PC^G_{pmsj} v^G_{pmsj} \\
 & - \sum_{j \in J} DC_{jm} w_{mj} - \sum_{j \in J} FC_j y_j - \sum_{f \in F, j \in J} FC_{fj} z_{fj} - \sum_{f \in F, j \in J} MC_{fj} x_{fj} + \\
 & \sum_{r \in R, j \in J} Q_{rj}^- e_{rj}^- - \sum_{r \in R, j \in J} Q_{rj}^+ e_{rj}^+ - \sum_{r \in R, j \in J} Q_{rj} e_{rj}
 \end{aligned}$$

Les contraintes du modèle

a. Contraintes exprimant la qualité environnementale du produit

La qualité environnementale du produit fini est donné par un vecteur constitué de trois attributs environnementaux déjà défini dans les modèles séparés (MPC et MLT). Ces attributs sont respectivement β , λ et ψ .

L'attribut environnemental lié aux émissions carbone des activités du transport :

$$\beta_j = \frac{\beta_{\max} - \sum_m \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \delta_p \beta_{pmsj} (y^T_{pmsj} + y^G_{pmsj}) - \sum_m \beta_{jm} y_{jm}}{\beta_{\max}} \quad (1)$$

L'attribut lié à la composition du produit fini :

$$\psi_j = \sum_p \mu_p \sum_{m \in M, s \in S} y^G_{pmsj} \quad (2)$$

L'attribut environnemental lié aux émissions des processus de fabrication :

$$\lambda_j = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_j}{\varepsilon_{\max}} \quad \text{avec } \varepsilon_j = \sum_{j \in J} \sum_f \sum_r \varepsilon_{rf} z_{fj} \quad (3)$$

$$G_j = \beta_j + \lambda_j + \psi_j \quad (4)$$

Il est à noter que chacun des attributs environnementaux peut être pondéré par un paramètre de sensibilité du marché à cet attribut. En fait, selon le secteur et la nature du produit, un attribut peut avoir plus importance que les autres. Par exemple, dans le secteur agro-alimentaire ou textile, l'attribut lié à la composition peut avoir un paramètre de sensibilité plus important que les deux autres attributs.

$$G_j = \mu_\beta \beta_j + \mu_\lambda \lambda_j + \mu_\psi \psi_j \quad \text{avec } \mu_\beta + \mu_\lambda + \mu_\psi = 1 \quad (5)$$

L'attribut de la qualité environnementale à considérer est :

$$G = \text{Min}(\beta_j, j \in J) \quad (6)$$

b. Contraintes exprimant la demande

La demande totale est la somme de la demande de base \bar{D} et la demande des clients verts qui est donnée par $\alpha * G$ où α est un coefficient positif qui représente la sensibilité du marché à la qualité environnementale du produit.

$$d = \bar{D} + \alpha * G \quad (7)$$

c. Contraintes d'unicité

Dans ce qui suit, nous considérons un ensemble de contraintes d'unicité. Ces contraintes nous permettent de simplifier la modélisation de l'attribut environnemental lié à la composition du produit. Nous avons vu dans le chapitre 4 que le relâchement de la contrainte d'unicité de sites de production a nécessité une modélisation plus délicate de l'attribut environnemental. Dans le modèle global, nous relâchons la contrainte d'unicité de site de production mais nous imposons que par site et par composant donné un seul type (ordinaire ou vert) peut être sélectionné. Nous considérons également qu'un seul processus de production est installé par site de production.

Pour un composant donné et par site de production donné, le modèle choisit seulement un type parmi ordinaire (o) ou vert(G).

$$y_{pmsj}^o + y_{pmsj}^G = 1 \quad j \in J, p \in P \quad (8)$$

Un seul processus de production est installé sur un site de production

$$\sum_f z_{fj} = y_j \quad j \in J \quad (9)$$

Nous imposons que pour un composant donné l'approvisionnement se fait à partir d'un seul fournisseur.

$$\sum_{m \in M, s \in S} (y_{pmsj}^G + y_{pmsj}^o) \leq 1 \quad p \in P, j \in J \quad (10)$$

Nous supposons qu'un seul mode de transport peut être utilisé sur chaque lien (entre deux nœuds) de la chaîne logistique, comme c'est le cas dans la plupart des situations réelles. Les contraintes (11) et (12) imposent respectivement qu'un seul mode de transport soit sélectionné pour acheminer un composant donné à partir d'un fournisseur s vers un site de production j et qu'un seul mode de transport soit sélectionné pour l'acheminement du produit fini à partir d'un site de production donné j vers la zone clients.

$$\sum_m y_{pmsj} \leq 1 \quad p \in P, s \in S, j \in J \quad (11)$$

$$\sum_m y_{mj} \leq 1 \quad j \in J \quad (12)$$

d. Contraintes de conservation des flux:

La production doit satisfaire au plus la demande des clients :

$$\sum_j \sum_m w_{mj} \leq D \quad (13)$$

La quantité distribuée doit être égale à la quantité produite :

$$\sum_j \sum_m w_{mj} = \sum_{j \in J} \sum_{f \in F} x_{jf} \quad (14)$$

La quantité totale nécessaire d'un composant donné p pour la production totale (i.e., $\delta_p \sum_{f \in F} x_{jf}$) est égale à la quantité totale de ce composant p achetée

$$\sum_m \sum_s (v_{pmsj}^o + v_{pmsj}^G) = \delta_p \sum_{f \in F} x_{jf}, \quad p \in P, j \in J \quad (15)$$

La contrainte suivante limite la production des sites :

$$x_{fj} \leq C_{jf}^{\max} \quad j \in J, f \in F \quad (16)$$

e. Contraintes logiques

Les contraintes (17), (18) et (19) assurent qu'un mode de transport n'est sélectionné sur un arc de la chaîne logistique que s'il est utilisé pour le transport des produits sur cet arc. Les contraintes (17) et (18) concernent la sélection des modes de transport entre les fournisseurs et les sites de production et la contrainte (19) concerne le choix de mode de transport entre les sites de production et la zone des clients.

$$\frac{1}{K} y_{pmsj}^G \leq v_{pmsj}^G \leq K y_{pmsj}^G \quad p \in P, m \in M, s \in S, j \in J \quad (17)$$

$$\frac{1}{K} y_{pmsj}^o \leq v_{pmsj}^o \leq K y_{pmsj}^o \quad p \in P, m \in M, s \in S, j \in J \quad (18)$$

$$w_{mj} \leq K y_{mj} \quad m \in M, j \in J \quad (19)$$

Il faut ensuite imposer la production dans un site de production ouvert

$$\frac{1}{K} y_j \leq x_j \leq K y_j \quad j \in J \quad (20)$$

NB : K : constante positive assez grande.

f. *Contraintes exprimant les législations environnementales portant sur les émissions des processus de production*

La contrainte suivante permet de déterminer la quantité totale dégagée de l'émission r dans le site j

$$e_{rj} = \sum_f \varepsilon_{rf} x_{fj} \quad j \in J, r \in R \quad (21)$$

$$e_{rj} - e_{rj}^+ + e_{rj}^- = E_{rj}^T y_j \quad j \in J, r \in RE_j \quad (22)$$

$$e_{rj} < E_{rj} y_j \quad j \in J, r \in RS_j \quad (23)$$

g. *Contraintes de signe et d'intégrité :*

$$\beta, \lambda, \psi, e_m, e_m^-, e_m^+, x_j, x_{fj}, v_{pmsj}^G, v_{pmsj}^O, w_{mj}, \geq 0$$

$$y_j, z_{fj}, y_{pmsj}^O, y_{pmsj}^G, y_{mj} \in \{0,1\}$$